



SELLO EDITORIAL
AMERICANA



EXTRACCIÓN DE ACEITE DE **AGUACATE**

Seguridad, sostenibilidad
e ingeniería computacional

AUTORES

Ángel Darío González-Delgado
Tamy Carolina Herrera-Rodríguez
Vianny Riyeiny Parejo-Palacio

González Delgado, Ángel Darío
Extracción de aceite de aguacate: Seguridad, sostenibilidad, e ingeniería computacional/ Ángel Darío González Delgado, Tamy Carolina Herrera Rodríguez y Vianny Ríeiny Parejo Palacio. -- Barranquilla: Sello Editorial Americana 2025.
201 páginas.; ilustraciones, ?? cm
ISBN 978-958-5169-99-9 (versión digital)

Nota 1: Incluye conclusiones y recomendaciones generales (páginas, 150 -153); y divulgación de resultados de la investigación (página, 201)

Nota 2: incluye referencias bibliográficas, glosario de términos y abreviaturas, al final de la obra (páginas, 155 -199)

1. Corporación Universitaria Americana – Proyectos de investigación 2. Aceite de aguacate – Extracción – investigaciones. 3. Extracción de aceite – investigaciones. 4. Ingeniería sostenible -- investigaciones

5. Ingeniería de procesos. 6. Simulación por ordenador. 7. Seguridad industrial. I. González Delgado, Ángel Darío, coautor, II. Herrera Rodríguez, Tamy Carolina, coautor, III. Parejo Palacio, Vianny Ríeiny, coautor. IV. Título.

665.3444 G6431 SCDD23 ed.

Corporación Universitaria Americana- Sistema de Bibliotecas



Corporación Universitaria Americana ©

Sello Editorial Americana©

ISBN Digital: **978-958-5169-99-9**

EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE: SEGURIDAD, SOSTENIBILIDAD E INGENIERÍA COMPUTACIONAL

AUTORES:

Ángel Darío González-Delgado

Tamy Carolina Herrera-Rodríguez

Vianny Ríeiny Parejo-Palacio

Presidente

JAIME ENRIQUE MUÑOZ

Rectora Nacional

ALBA LUCÍA CORREDOR GÓMEZ

Vicerrector Académico Nacional

MARIBEL YOLANDA MOLINA CORREA

Vicerrector de Investigación Nacional

RICARDO SIMANCAS TRUJILLO

Coordinación Sello Editorial

EVA LUNA CONTRERAS MARIÑO

Sello Editorial Americana

selloeditorialamericana@americana.edu.co

Diagramación y portada: Kelly J. Isaacs González

Imagen portada: Freepik.com

Corrección de estilo: Eva Luna Contreras Mariño

1ª edición: 2025-12-01

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada en sistema recuperable o transmitida en ninguna forma o por medio electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, u otro, sin previa autorización por escrito del Sello Editorial Americana y de los autores. Los conceptos expresados en este documento son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente corresponden con los de la Corporación Universitaria Americana y da cumplimiento al Depósito Legal según lo establecido en la Ley 44 de 1993, los decretos 460 del 16 de marzo de 1995, el 2150 de 1995, el 358 de 2000 y la Ley 1379 de 2010.

EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE: SEGURIDAD, SOSTENIBILIDAD E INGENIERÍA COMPUTACIONAL

AUTORES:

Ángel Darío González-Delgado
Tamy Carolina Herrera-Rodríguez
Vianny Riyeiny Parejo-Palacio

RESEÑA DE LA OBRA

Este ejemplar aborda la evaluación sostenible del proceso de obtención de aceite de aguacate criollo antillano usando hexano como solvente, abarcando el diseño y modelado de proceso, así como también el análisis económico, ambiental, de seguridad y exergético. El proceso cuenta con una capacidad de producción de 1,000.66 t/año de aceite de aguacate y una capacidad de procesamiento de 10,605 t/año de aguacate de la variedad criollo-antillano. Se encontró que el diseño propuesto es seguro con un índice de seguridad inherente de 17 puntos y presenta una eficiencia exergética global de 30,69%, siendo la etapa compuesta por los procesos de destilación, condensación y enfriamiento las que mayores irreversibilidades presenta. Del análisis ambiental se obtuvo que el proceso es amigable con el medio ambiente y presenta impactos potenciales bajos, del orden $2,17 \times 10^0$ PEI/kg-p para los impactos generados por unidad de masa teniendo en cuenta los impactos del producto y del consumo de energía durante el proceso.

Palabras clave: Aceite de aguacate; Análisis económico; Eficiencia exergética; Impactos ambientales potenciales; Modelado; Seguridad de procesos.

DEDICATORIAS

| 5

Nuevamente a mi hijo, Luis Ángel González Fontalvo, eres la semilla más valiosa que he sembrado en esta tierra, y en ti florece cada día mi esperanza, mi fuerza y mi propósito. Este libro es más que palabras y conocimientos; es una herencia de esfuerzo, sueños y amor por el aprendizaje. Que cuando crezcas y puedas comprender los conocimientos aquí plasmados, encuentres en estas páginas la inspiración para creer en tu poder, para transformar el mundo con tu inteligencia y tu bondad, y para recordar siempre que todo lo que haces con pasión y convicción deja huella. Tú eres mi mayor obra, mi motor y mi luz.

Angel Darío González-Delgado

A mi madre, Milagro Rodríguez, cuya luz y amor continúan guiando mis pasos. A mi sobrino, Benjamín Pico, por la alegría que da a mi vida. A mis hermanas, Karen y Keyla Herrera, y a mi cuñado, Jhonar Pico, por su constante cariño, guía, apoyo y generosidad.

Tamy Carolina Herrera-Rodríguez

CONTENIDO



AA RESEÑA DE LA OBRA

DEDICATORIAS

AGRADECIMIENTOS

AUTORES

INTRODUCCIÓN

1. GENERALIDADES DEL AGUACATE

1.1 Variedades de aguacate

1.2 Cultivo de aguacate

1.3 Enfermedades que afectan el cultivo de aguacate

1.3.1 Marchitez (*Verticillium* Nees)

1.3.2 Roña (*Sphaceloma perseae* Jenk)

1.3.3 Pudrición de raíces (*Phytophthora cinnamomi*)

1.3.4 Mancha angular, mancha negra del fruto

(*Pseudocercospora purpurea*)

1.3.5 Llaga radical

1.4 Daños internos del fruto

1.5 Afectaciones post cosecha

1.6 Composición del fruto de aguacate

1.7 Aceite de aguacate

1.8 Calidad del aceite de aguacate

1.9 El caso de los Montes de María

2. AVANCES EXPERIMENTALES: TÉCNICAS DE EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE AGUACATE

2.1. Técnicas de extracción de aceite

- 2.1.1. Extracción Soxhlet*
- 2.1.2. Extracción Asistida por Microondas*
- 2.1.3. Extracción Asistida por Ultrasonido*
- 2.1.4. Extracción con Líquidos Presurizados*
- 2.1.5. Extracción por Fluidos Supercríticos*
- 2.1.6. Extracción enzimática*
- 2.1.7. Extracción por tecnología de membranas*
- 2.1.8. Extracción por campos eléctricos pulsados*
- 2.1.9. Extracción por calentamiento óhmico*
- 2.1.10. Extracción con agua subcrítica*
- 2.1.11. Extracción con solventes eutécticos profundos*

2.2. Caracterización del aceite

- 2.2.1. Determinación del índice de yodo*
- 2.2.2. Determinación del índice de acidez*
- 2.2.3. Determinación del índice de refracción*
- 2.2.4. Determinación del índice de saponificación*
- 2.2.5. Análisis de color*

2.3. Conclusiones

3. ESCALAMIENTO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE MEDIANTE SIMULACIÓN DE PROCESOS

3.1. Determinación del perfil de ácidos grasos de pulpa de aguacate

3.2. Modelado del proceso de extracción de aceite de aguacate

- 3.2.1. Descripción del proceso de extracción de aceite de aguacate*
- 3.2.2. Validación de resultados de la extracción de aceite de aguacate*

3.3. Conclusiones

4. EVALUACIÓN DE CANTIDAD Y CALIDAD DE ENERGÍA BASADA EN ANÁLISIS EXERGÉTICO EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE

4.1 Cálculo de la exergía de un proceso

4.2 Condiciones de operación y etapas de proceso

5. ASPECTOS DE SEGURIDAD INTRÍNSECA EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE

5.1 Principios de la seguridad inherente

5.2 Diferentes métodos de análisis de seguridad

5.2.1. *Índice de prototipo de seguridad inherente (PIIS)*

5.2.2. *HAZOP*

5.2.3 *índice de incendio y explosión de DOW*

5.2.4 *Diseño intrínsecamente más seguro (ISD)*

5.2.5. *Índice de seguridad inherente (ISI)*

5.3 Resultados

5.3.1 *Cálculo del subíndice por reacciones químicas*

5.3.2 *Subíndice por condiciones de proceso*

5.3.3. *Índice de Seguridad Intrínseca total (ITI)*

5.4 Conclusiones

6. ASPECTOS AMBIENTALES EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE

6.1 Cálculo del impacto ambiental por medio del algoritmo de reducción de residuos

6.1.1. *Impactos potenciales*

6.1.2. *Categorías atmosféricas*

6.1.3. *Categorías toxicológicas*

6.2 Resultados

6.2.1 *Impactos atmosféricos del proceso*

6.2.2 *Impactos toxicológicos del proceso*

6.2.3 *Impactos totales del proceso*

6.3 Conclusiones

7. INDICADORES ECONÓMICOS EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE

7.1. Tipos de costos

7.1.1. *Inversión de capital total (TCI)*

7.1.2. *Costos de operación (OC)*

7.1.3. *Costos fijos y operativos anualizados*

7.2. Indicadores económicos**7.3. Resultados**

7.3.1. Evaluación técnico-económica del proceso de extracción de aceite de aguacate

7.3.2. Análisis sensibilidad técnico-económica del proceso de extracción de aceite de aguacate

7.4. Conclusiones**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES
DE LA INVESTIGACIÓN****EPÍLOGO****REFERENCIAS****GLOSARIO DE TÉRMINOS****ABREVIATURAS****ANEXOS**



AGRADECIMIENTOS

| 11



Los autores agradecen a la Universidad de Cartagena, por el suministro de horas docentes, equipos y software necesarios para concluir exitosamente este libro. De igual manera agradecemos a la Editorial de la Corporación Universitaria Americana de Barranquilla, en especial a su Coordinadora del Sello Editorial, Eva Luna Contreras Mariño por su voto de confianza para recibir nuestro primer borrador de manuscrito. Finalmente, agradecemos a colegas, estudiantes y colaboradores, especialmente a la profesora Lesly Tejeda, el Doctor Aníbal Alviz, la candidata a Doctora Liseth Mallarino, y los ingenieros María Sanjuan, Sofía García y Eduardo Aguilar.

Ángel Darío González-Delgado

Tamy Carolina Herrera-Rodríguez

Vianny Riyeiny Parejo-Palacio

AUTORES

Ángel Darío González Delgado

Ingeniero Químico y Doctor en Ingeniería Química, ganador del Segundo Premio Nacional Aporte a la Ingeniería Química Colombiana 2025 y el Premio Odebrecht para el Desarrollo Sostenible 2014, con experiencia docente, administrativa y en investigación en universidades públicas y privadas. Ha publicado 270 artículos científicos y es autor/coeditor de 9 libros. Experto en desarrollo de metodologías de evaluación de procesos industriales, síntesis de procesos químicos, evaluación ambiental, económica, energética y de seguridad de procesos industriales, mejoramiento de procesos químicos, aprovechamiento de energía fósil y renovable, biocombustibles y biorrefinerías e Ingeniería de Procesos Asistida por Computador. Actualmente se desempeña como Docente de Planta de la Universidad de Cartagena bajo la categoría de Profesor Asociado y Director Científico del XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Química.

Tamy Carolina Herrera-Rodríguez

Ingeniera Química de la Universidad de Cartagena y Tecnóloga en Procesos de la Industria Química del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Perteneció al Grupo de Investigación Nanomateriales e Ingeniería de Procesos Asistida por Computador (NIPAC) y colaboró como pasante en el proyecto “Desarrollo de una topología de biorefinería para el aprovechamiento sostenible del aguacate (*Laurus Persea L*) producido en la región de los Montes de María”. Tiene experiencia investigativa en análisis ambientales, económicos, exergéticos, seguridad y de sostenibilidad de procesos. Ha participado en congresos como ponente y ha publicado artículos científicos relacionados con la evaluación de sostenibilidad del aprovechamiento de biomásas. La ingeniería Herrera-Rodríguez fue galardonada con el III Premio Rebeca Uribe Bone 2023, otorgado por el Consejo Profesional de Ingeniería Química – CPIQ a la mejor tesis grado de pregrado de toda Colombia realizado por una mujer o grupo de mujeres en la categoría Innovación.

Vianny Riyeiny Parejo-Palacio

Ingeniera Química de la Universidad de Cartagena. Experiencia investigativa en evaluaciones de seguridad de procesos, exérgica, económica y



12 |

EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE: SEGURIDAD, SOSTENIBILIDAD E INGENIERÍA COMPUTACIONAL

ambiental; además de uso software para modelado de proceso. Fue galar- donada con el III Premio Rebeca Uribe Bone 2023, otorgado por el Con- sejo Profesional de Ingeniería Química – CPIQ a la mejor tesis grado de pregrado de toda Colombia realizado por una mujer o grupo de mujeres en la categoría Innovación. La ingeniera Parejo-Palacio fue integrante del Grupo de investigación Nanomateriales e Ingeniería de Procesos Asistida por Computador (NIPAC) donde participó en congresos y ponencias, pu- blicación de artículos científicos, pasantía de investigación, además cola- boró en el proyecto de convocatoria “Desarrollo de una topología de biore- finería para el aprovechamiento sostenible del aguacate (*Laurus Persea L*) producido en la región de los Montes de María”, a partir del cual se generó el presente producto.





INTRODUCCIÓN

El aguacate ha trascendido su condición de simple fruto para convertirse en un motor de transformación económica, social y ambiental en muchas regiones del mundo. Su creciente demanda, motivada por sus beneficios nutricionales y cosméticos, ha impulsado a países como Colombia a posicionarse como protagonistas en su producción. En especial, el departamento de Bolívar y los Montes de María albergan una variedad criolla-antillana de alto potencial, pero que, paradójicamente, enfrenta limitaciones estructurales que afectan su comercialización y sostenibilidad.

Este libro nace del deseo de transformar esa realidad mediante el aprovechamiento integral del aguacate, especialmente aquellos frutos que no llegan al mercado por defectos físicos o deterioro. Desde una mirada holística e interdisciplinaria, se aborda la extracción de aceite a partir de la pulpa, integrando criterios técnicos, energéticos, económicos, ambientales y de seguridad.

En el primer capítulo se presenta una caracterización detallada del aguacate, sus variedades y enfermedades, con énfasis en los factores que afectan su cultivo y comercialización en la región. Se identifica la urgencia de alternativas productivas sostenibles para reducir pérdidas y mitigar impactos ambientales generados por los residuos agrícolas.

El segundo capítulo recopila los avances más relevantes en las técnicas de extracción de aceite de aguacate. Desde métodos tradicionales hasta innovaciones como la extracción supercrítica, se analizan sus ventajas, desafíos y aplicaciones industriales. Se destaca la importancia de mejorar

la calidad del aceite y su potencial para los sectores alimentario, cosmético y farmacéutico.

En el tercer capítulo se desarrolla la simulación computacional de una planta de extracción a escala industrial. A partir de información experimental, balances extendidos de materia y balances de energía, se muestran los rendimientos esperados al usar hexano como solvente, validando los datos con literatura científica y sentando las bases para la implementación del proceso en contextos reales a mayores escalas.

El cuarto capítulo profundiza en el análisis exergético del proceso, calculando las exergías físicas y químicas de todas las corrientes que hacen parte del proceso productivo, así como las exergías por transferencia de masa, calor y trabajo de todas las etapas del proceso, identificando los puntos críticos de pérdida energética y proponiendo medidas para optimizar el aprovechamiento de la energía. Este análisis permite visualizar oportunidades de mejora mediante la integración de corrientes de vapor, agua y residuos.

En el quinto capítulo, se analiza la seguridad inherente del proceso utilizando el método del análisis de seguridad inherente (ISI), calculando diferentes subíndices relacionados tanto con la seguridad química, como con la seguridad espacial y operativa. Se demuestra que, bajo condiciones operativas controladas, el proceso es seguro, aunque se recomienda una adecuada selección de materiales y protocolos para mitigar los riesgos asociados al uso de solventes inflamables como el hexano.

El sexto capítulo se dedica a la evaluación ambiental del proceso utilizando el Algoritmo de Reducción de Residuos (WAR), donde se calcularon los impactos ambientales potenciales generados y de salida del proceso productivo, tanto por unidad de tiempo como por unidad de masa de aceite de aguacate producido, y los impactos bajo categorías atmosféricas y toxicológicas, identificando oportunidades para disminuir los efectos atmosféricos y toxicológicos mediante el aprovechamiento de subproductos y la recirculación de recursos.

El séptimo capítulo aborda la viabilidad económica del proyecto. Con un análisis detallado del costo-beneficio, inversión inicial, retorno y punto de equilibrio, a partir de información de la capacidad de procesamiento, costos de materias primas y de productos finales, costos de servicios in-



dustriales, costos de equipos, costos de instalación, suministros y mano de obra operativa, gastos de construcción entre otros, se demuestra que la planta es rentable a mediano plazo, además de generar empleo y reducir la carga ambiental en la región.



16 |

EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE: SEGURIDAD,
SOSTENIBILIDAD E INGENIERÍA COMPUTACIONAL

Finalmente, se presentan conclusiones generales de la investigación y recomendaciones clave para el futuro desarrollo del proceso, enfocándose en el aprovechamiento de subproductos como la semilla y la cáscara, así como la integración de metodologías adicionales como el análisis de ciclo de vida (ACV). Se hace énfasis en la necesidad de continuar investigando y optimizando procesos que promuevan una economía circular en zonas rurales.

Este libro es, en esencia, una hoja de ruta para transformar un problema agrícola y ambiental en una oportunidad de desarrollo sostenible, basado en la ciencia, la innovación y la sensibilidad por las comunidades. Invita a repensar los residuos como recursos, y a las regiones rurales como centros de inteligencia productiva y resiliencia social.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES DEL AGUACATE

| 17



Un área de gran potencial en las industrias química, alimentaria, cosmética y farmacéutica es la obtención de compuestos bioactivos a partir de materias primas vegetales, sin embargo, este campo se enfrenta al desafío de recuperar los fitoquímicos, debido a que estos compuestos son sensibles a factores como la oxidación y degradación, por lo que se requiere la implementación de alternativas de estabilización que garanticen la preservación integral de dichos compuestos (Abaide et al., 2017).

El aguacate, fruto de la *Persea americana* Mill., ha surgido como un fruto de interés particular en este contexto. Cultivado predominantemente en climas tropicales o subtropicales, este fruto perteneciente a la familia de las Lauráceas se clasifica como una planta dicotiledónea, caracterizada por la presencia de dos cotiledones, lo que lo ubica entre las especies de plantas que poseen flores. Reconocido por su rica composición en lípidos y minerales esenciales, como fósforo, potasio y magnesio, el aguacate ofrece una amplia gama de fitoquímicos que presentan propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, convirtiéndolo en un objeto de estudio promotor en la búsqueda de compuestos bioactivos de origen vegetal (Tan et al, 2018).

En los últimos años, hemos sido testigos de un significativo aumento en la popularidad del aguacate, lo que ha desencadenado una diversificación en la gama de productos derivados disponibles en el mercado (Green



& Wang, 2020). Entre estos productos destaca el aceite de aguacate, el cual ha ganado una considerable aceptación como un recurso destacado para el cuidado dermatológico y capilar, debido a que sus productos derivados exhiben propiedades terapéuticas beneficiosas para la piel y están experimentando un crecimiento en su producción por parte de la industria cosmética gracias a sus cualidades hidratantes y nutritivas. No obstante, el aceite de aguacate no se limita únicamente al ámbito de la cosmética, sino que también se ha incorporado a la gastronomía como una alternativa saludable (Rydlewski et al., 2020). El aceite de aguacate no solo proporciona nutrición para la piel y el cabello, sino que también se destaca su versatilidad en la cocina, donde se utiliza como una alternativa al aceite de oliva. Esta diversificación en el uso del aceite de aguacate refleja su creciente reconocimiento como un recurso valioso y multifacético en diversos campos, desde el cuidado personal hasta la alimentación consciente. Su incorporación en la gastronomía como una opción saludable subraya aún más su estatus como un elemento esencial en la vida cotidiana y en la búsqueda de un bienestar integral.

Dada la relevancia de los múltiples beneficios vinculados al uso y consumo de aguacate y sus derivados, resulta crucial adentrarse en el conocimiento detallado del proceso completo de producción y obtención de este apreciado fruto. Comprender a fondo la cadena de producción no solo permite apreciar la complejidad detrás de su cultivo, sino también valorar la labor de los agricultores y el impacto que tiene en la economía y la salud de quienes lo consumen. Estudiar este proceso nos lleva a apreciar la interconexión entre la naturaleza, la ciencia y la labor humana, y nos brinda una perspectiva más completa sobre la importancia de este fruto en nuestra vida cotidiana.

El aguacate, es un fruto de mucha antigüedad en el contexto del continente americano. Según los planteamientos de Williams (1977), sus raíces se remontan a las regiones montañosas del centro y este de México, así como a áreas elevadas de Guatemala. La investigación llevada a cabo por Smith (1969) en una gruta de Coxcatlán, ubicada en la región de Tehuacán, Puebla, México, respalda la presencia del aguacate en América en un rango temporal que abarca desde aproximadamente los 8000 hasta los 7000 años antes de la era común. Posteriormente, se propagó hacia el sur del continente, alcanzando países como Venezuela, Ecuador, Perú y Colombia. Al decaer los cultivos de café el aguacate emergió como una fuente de ingresos significativa para los agricultores de la región, obteniendo reconocimiento tanto en los mercados locales

como nacionales (Yabrudy Vega, 2012). En la década de los 40 se popularizó la siembra de semillas de aguacate con el propósito de dar sombra a los cafetales; sin embargo, con el paso del tiempo, los municipios productores de aguacate en los Montes de María se consolidaron como la principal zona de producción de este fruto en el país, a pesar de la baja tecnificación de los cultivos ni la aplicación de técnicas adecuadas de siembra y poda (Burbano-Figueroa, 2019).

Hemos sido testigos de la creciente popularidad del aguacate, lo cual ha conllevado a un notable crecimiento de la demanda internacional anual, la cual algunos autores proyectan en un 5% hasta el año 2025; es preciso tener en cuenta que esta demanda es suplida por los países productores, entre los cuales se encuentra México como principal productor global, seguido en menor proporción por República Dominicana, Perú y Colombia quienes han expandido su producción para aventurarse al mercado de exportación principalmente a Estados Unidos, Europa y China. Dicho lo anterior, América Latina emerge como una región de considerable potencial para la producción y exportación de aguacate, gracias a factores como la abundancia de tierras disponibles y las condiciones climáticas idóneas para el cultivo de este fruto, países como Perú y Colombia vislumbran la oportunidad de expandir sustancialmente sus áreas de cultivo y producción (Mopan et al., 2023).

Ha sido la ascendente demanda internacional la que ha conllevado a vislumbrar oportunidades de exportación para Colombia, convirtiendo al aguacate en un producto simbólico del agro en el país, donde la oferta de dicho fruto exhibe una notable diversidad, evidenciada por la presencia de diversas variedades comerciales. No obstante, el aguacate Hass sobresale como la variedad más ampliamente distribuida a nivel global, impulsada por su creciente popularidad asociada a la difusión internacional de la gastronomía mexicana tradicional (Peinado & Cadavid, 2020). Adicionalmente los cultivos de la variedad Hass han ganado reconocimiento en el mercado europeo gracias a su calidad, sabor y el cumplimiento de los estándares sanitarios. El desarrollo y promoción del aguacate Hass producido en Colombia se convirtió en un proyecto estratégico a nivel nacional, respaldado por entidades gubernamentales y organizaciones como la Asociación Nacional de Exportadores (Analdex) y la Corporación de Productores y Exportadores de Colombia (CorpoHass). Fue a través de diversas iniciativas desarrolladas, que impulsaron la producción y exportación de este fruto, beneficiando a productores en diversas regiones del país; dichas iniciativas implican la implementación de medidas como capacitaciones para los productores, con el objetivo de promover un manejo integral y empresarial de los predios, así como la aplicación de buenas prácticas agrícolas y un monitoreo riguroso de





20 |

EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE: SEGURIDAD,
SOSTENIBILIDAD E INGENIERÍA COMPUTACIONAL

los cultivos para detectar y controlar plagas. Lo anterior representó un paso importante para beneficiar a los productores en varios departamentos del país (Yabrudy Vega, 2012).

El gobierno colombiano ha focalizado sus esfuerzos en ampliar su presencia en el mercado internacional, diversificando su gama de productos y fortaleciendo sus lazos comerciales globales. En este contexto, destaca el papel del aguacate como un producto agrícola clave en las relaciones comerciales del país y la capacidad de distribución a diversos mercados. Adicionalmente, la puesta en marcha del Tratado de Libre Comercio entre Colombia y Corea del sur permitió impulsar diversos mercados entre ellos la exportación de aguacates, con el fin de satisfacer la demanda coreana que evidencia un aumento exponencial y notable en el consumo de este producto, pasando de 1.515 toneladas en 2015 a 8.243 toneladas en 2019 (Peinado & Cadavid, 2020).

En los últimos tiempos, se ha observado un cambio notable en el mercado, la producción y las exportaciones de aguacates en Colombia. Esta transformación se ha evidenciado no solo en el aumento de las cantidades vendidas, sino también en la diversificación de los actores que participan en el proceso de producción. Examinar la capacidad de producción de aguacates en Colombia nos brinda la oportunidad de comprender el favorable escenario que el país posee. La variedad Hass, disponible durante la mayoría de los meses del año, consolida a Colombia como uno de los principales exportadores de este producto. Los autores Peinado y Cadavid (2020) plantean que la producción se concentra en los departamentos de Tolima, Antioquia, Caldas, Santander, Bolívar, Cesar, Valle del Cauca, Risaralda y Quindío abarcando el 86% del área de cultivo del país; No obstante, la variedad Hass solo abarca el 21% de la superficie total cultivada en Colombia según los reportes gubernamentales del ministerio de agricultura para el año 2018. Colombia registra dos temporadas de cosecha de aguacate al año: la principal, que ocurre entre octubre y enero, y otra que varía según la ubicación del cultivo, manifestándose entre los meses de mayo y septiembre (PROCOLOMBIA, 2018).

Particularmente en el departamento de Bolívar se ubica la región Montes de María, la cual se distingue por el predominio de la variedad antillana del aguacate, la cual incluye los tipos cebo, leche y manteco, cuya densidad de árboles oscila entre 100 y 130 por hectárea, para árboles entre 10 y 50 años (Yabrudy Vega, 2012). Esta zona se conoce también como la Serranía



de San Jacinto, y constituye un conjunto montañoso de baja altura ubicado en las proximidades del Caribe, al norte de los Andes colombianos. Esta área se destaca como el principal productor de aguacate en la región del Caribe colombiano y figura entre los principales productores de aguacate antillano (*Persea americana* var. *americana*) en el país. En este entorno, los productores adoptan un enfoque de intervención mínima en el cultivo, desempeñando principalmente el papel de recolectores en lugar de agricultores. Los sistemas agroforestales en los Montes de María se caracterizan por ser economías de subsistencia no tecnificadas que utilizan el aguacate como sombra para otros cultivos, como fuente de frutos y como vía de obtención de ingresos económicos (Burbano-Figueroa, 2019).

1.1 Variedades de aguacate

Las variedades cultivadas de *Persea americana* Mill. C se clasifican en tres razas hortícolas distintas. Aunque estas tres razas no exhiben diferencias lo bastante significativas como para ser clasificadas como especies distintas, sí muestran variaciones que las hacen merecedoras de ser consideradas como entidades separadas, ya sea en calidad de subespecies o variedades botánicas. Esta distinción se fundamenta en el hecho de que las tres razas comparten un genoma altamente similar, lo cual sugiere una estrecha relación genética entre ellas (Sánchez-Pérez, 1999).

Figura 1.1.

Aguacate que se cultiva en la región de los Montes de María, Bolívar.



Nota: Instituto Colombiano Agropecuario – ICA (2013).



- Raza antillana (*P. americana ssp americana*):

Se encuentra típicamente en regiones de baja altitud, desde el nivel del mar hasta menos de 1000 metros, caracterizadas por altas precipitaciones pluviales y temperaturas cálidas consistentes con ambientes tropicales húmedos. Se estima que la raza antillana tuvo su origen posiblemente en la costa del Pacífico de Centroamérica, abarcando desde Guatemala hasta Costa Rica. En áreas ecuatoriales con una misma latitud, esta raza muestra una adaptabilidad notable, compartiendo hábitat con otros frutales como el mango y el árbol del pan (Sánchez-Pérez, 1999). En la figura 1.1 se observa la variedad criollo-antillana que se cultiva en la región de los Montes de María, en el departamento de Bolívar, Colombia.

- Guatemalan race (*P. americana ssp. Guatemalensis*):

Esta variedad de aguacate se distingue por tener una piel más gruesa, lo que proporciona una mayor protección a la pulpa en su interior. Además, la semilla tiende a ser más pequeña y está firmemente ajustada en la cavidad del fruto. Requiere un período de maduración considerablemente más prolongado en comparación con otras variedades (Bergh & Ellstrand, 1986). Se encuentra mejor adaptada a altitudes que oscilan entre 1.000 y 2.000 metros sobre el nivel del mar, y suele compartir su hábitat con cultivos como cítricos y chirimoya (Sánchez-Pérez, 1999).

- Mexican race (*P. americana ssp drymifolia*):

La variedad mexicana de aguacate se caracteriza por tener una piel frágil que proporciona escasa protección al fruto, siendo así mayormente vulnerable a daños durante el transporte o la manipulación de este. Además, la semilla tiende a ser grande y a menudo se suelta fácilmente de la cavidad, lo que puede resultar poco deseable comercialmente. Los frutos de esta variedad suelen ser más pequeños de lo ideal para el mercado (Bergh & Ellstrand, 1986). Este ejemplar de fruto prospera mejor en altitudes que van desde aproximadamente 1500 hasta 3000 metros sobre el nivel del mar, compartiendo hábitat con cultivos como manzanos, duraznos y en áreas de bosque de pino-encino (Sánchez-Pérez, 1999).

Tabla 1.1.

Características comparativas para las principales razas de aguacate.

Característica	Guatemalteca	Mexicana	Antillana
Textura de la cáscara	Corchosa	Membranosa	Correosa
Espesor de la cáscara	Gruesa	Delgada	Media
Peso del fruto Promedio	309,8 g	98,8 g	312,5 g
Orden de Adaptación tropical	Medio	Menor	Mayor
Coloración de la cáscara	crema y amarillo	crema y verde pálido	amarillo y crema
Forma de la semilla	base achatada con ápice cónico o redondeado	formas ovada y elíptica	base achatada con ápice cónico o redondeado
Precipitación pluvial	media	Menor	Alta
Altitud	Entre 1.000 y 2.000 msnm	De más de 1.700 msnm	Menor a 1.000 msnm
Temperaturas	cálidas y muy cálidas	frescas	muy cálidas
Ambientes	tropicales y subtropicales	templados y subtropicales	trópico húmedo

La Tabla 1.1 presenta un resumen de las principales características de las tres razas de aguacate más relevantes: la Antillana, la guatemalteca y la mexicana. Cada una exhibe particularidades en cuanto a su adaptación a diferentes climas, tamaño y textura del fruto.

1.2 Cultivo de aguacate

En el cultivo de aguacate encontramos diversos factores que inciden en el rendimiento, entre ellos se encuentra la condición del suelo, ya que debe tomarse en cuenta las características únicas de los nutrientes presentes en los suelos de la zona al momento de realizar la fertilización; otro factor influyente en el cultivo es el control de plagas, para lo cual resulta crucial tener un amplio conocimiento de las enfermedades del aguacate y su manejo. La calidad del agua es otro aspecto importante que reconocer como variante del rendimiento del cultivo, ya que esta es esencial para el transporte de nutrientes y minerales, y su contaminación puede afectar negativamente la producción. Lo anterior indica que cuidar estos aspectos



fundamentales garantiza mejorar la eficiencia económica y productiva en el rendimiento de los cultivos (Proyecto ColombiaMide, 2021). A continuación, se mencionan los beneficios de los cultivos con alto rendimiento:

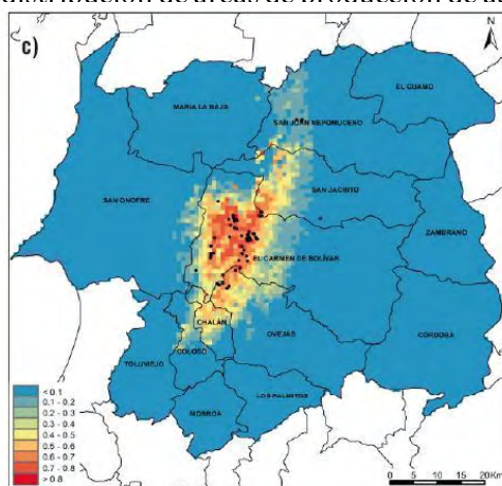
Reducir el riesgo de daños causados por plagas y enfermedades, promoviendo un óptimo crecimiento del cultivo y una fruta de alta calidad.

- Asegurar la producción ininterrumpida y prolongar los periodos de recolección.
- Incrementar los volúmenes de cosecha y, por ende, mejorar la rentabilidad mediante la selección apropiada de variedades.
- Gestionar la comercialización de manera eficaz para mantener un suministro estable en el mercado.

Considerando lo anterior, es pertinente conocer y tener en cuenta las características y particularidades de la zona o región a sembrar para garantizar un alto rendimiento de los cultivos comerciales, tomado ventaja de las diversas variedades del fruto y los híbridos interraciales como estrategia para prolongar la temporada de cosecha de aguacate a lo largo del año (Ríos-Castaño & Tafur-Reyes, 2003). En la figura 1.2 se observan los municipios que conforman la región de los Montes de María y las áreas de producción de aguacate.

Figura 1.2.

Municipios que conforman la región de los Montes de María, Bolívar y su distribución de áreas de producción de aguacate.



Nota: Burbano-Figueroa (2019).

1.3 Enfermedades que afectan el cultivo de aguacate

Las labores de diagnóstico e inspección en los cultivos comerciales de aguacate (*Persea americana* Mill.), llevadas a cabo por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), han resultado en la elaboración de un inventario de los principales problemas fitopatológicos que afectan a este fruto en Colombia. Dentro de las enfermedades de mayor relevancia, debido a su alta frecuencia y severidad en los cultivos de aguacate, se destacan:

1.3.1 Marchitez (*Verticillium* Nees)

Los árboles afectados por *Verticillium* sp. experimentan una interrupción en su crecimiento debido a la invasión del hongo en los tallos y ramas, lo cual conduce a una repentina marchitez parcial o total de las hojas en un lado de la planta. Las hojas en las ramas afectadas adquieren un tono café característico y permanecen unidas al árbol por un tiempo antes de caer, mientras que los frutos se mantienen caen tiempo después. Al examinar una sección longitudinal de la rama afectada, se evidencia una necrosis de color café claro que puede extenderse parcial o totalmente a lo largo de la misma (Tamayo Molano, 2007).

1.3.2 Roña (*Sphaceloma perseae* Jenk)

La roña, una enfermedad causada por el hongo *Sphaceloma perseae*, es una preocupación común en las regiones productoras de aguacate en Colombia y a nivel global, mostrando una mayor incidencia en áreas con alta humedad relativa. Se manifiesta con mayor severidad durante la etapa de cuajado, que marca la transición hacia el desarrollo del fruto, abarcando los primeros meses de su formación. Sus efectos perjudiciales se extienden a hojas, pedúnculos y frutos, agravados por los daños ocasionados por insectos, lo que puede facilitar la entrada de otros microorganismos patógenos.

La roña no solo representa una amenaza para la salud de los cultivos, sino también un desafío significativo para la comercialización internacional del aguacate, debido a los daños estéticos que ocasiona en la epidermis o cáscara del fruto. Esta afectación estética reduce la calidad del producto y limita su aceptación en los mercados internacionales, lo que a su vez impacta negativamente en la rentabilidad de los productores. Por lo tanto, el control eficaz de esta enfermedad es fundamental para asegurar la sostenibilidad y compe-



tividad de la industria del aguacate a nivel mundial (Ceballos Aguirre et al., 2023).

1.3.3 Pudrición de raíces (Phytophthora cinnamomi)

P. cinnamomi es la especie claramente identificada como responsable de la pudrición de raíces en áreas de cultivo de aguacate en nuestro país (Martínez Núñez et al., 2023). Los árboles infectados por el patógeno *Phytophthora cinnamomi* muestran síntomas como clorosis, producción de hojas pequeñas y defoliación. En etapas avanzadas, se observa el marchitamiento de yemas y la muerte del árbol uno o dos años después de la infección. Este patógeno del suelo puede parasitar múltiples hospederos en diferentes ecosistemas y sobrevive en el suelo como saprófito, lo que dificulta su erradicación una vez establecido. Se dispersa a través de equipos de cultivo, agua de escorrentía, infiltración y material infectado utilizado en la siembra.

La medida de control más efectiva es prevenir la contaminación mediante la siembra de plantas libres del patógeno en suelos limpios. En áreas afectadas, el uso de patrones resistentes es la estrategia más efectiva. A excepción de los fosfonatos, los fungicidas no son eficaces. Los fosfonatos aplicados en el suelo, aspersiones foliares o inyecciones en el tronco pueden controlar la enfermedad a un costo razonable. Una estrategia integrada de control requiere material vegetal de siembra en buenas condiciones sanitarias, suelos bien drenados y un manejo adecuado del cultivo, especialmente en términos de irrigación y control químico con fungicidas adecuados (Reina-Noreña et al., 2015)

1.3.4 Mancha angular; mancha negra del fruto (Pseudocercospora purpurea)

Una lesión superficial ligeramente deprimida, de tonalidad negra con bordes bien definidos, que pueden presentar una coloración rojiza, con formas angulosas o irregulares (Reina-Noreña et al., 2015).

1.3.5 Llaga radical

Para el aguacate Hass destinado a la exportación, se han establecido rigurosos parámetros de calidad que permiten una clasificación precisa de la fruta, considerando tanto los daños de origen biótico, como enfermedades o plagas, como los daños de origen abiótico, relacionados con labores agrícolas, condiciones ambientales, insumos y herramientas utilizadas en el cultivo. Los au-



26 |

tores Ceballos Aguirre et al. (2023) plantean que es importante destacar que los criterios principales para desechar la fruta no solo se limitan a los daños estéticos, sino que también tienen en cuenta la capacidad de estos daños para favorecer la rápida entrada de microorganismos que aceleran su deterioro. Entre los criterios de descarte más relevantes se incluyen:

- Frutos sin pedúnculo: La ausencia de pedúnculo facilita la entrada de microorganismos que provocan la descomposición de la pulpa durante el almacenamiento, comprometiendo la calidad del aguacate.
- Frutos con daños mecánicos: Tales como rayaduras o cortes, estos daños no solo afectan la apariencia del fruto, sino que también aceleran su proceso de deterioro y reducen su calidad para el consumo. Es esencial descartar estos frutos para mantener los estándares de calidad exigidos en el mercado de exportación.

| 27



1.4 Daños internos del fruto

En el contexto del cultivo, tanto la lenticelosis como la pudrición del pedúnculo se manifiestan como infecciones latentes en los frutos inmaduros, sin ocasionar un deterioro interno aparente. Estas afecciones se manifiestan en etapas posteriores, ya sea durante el almacenamiento poscosecha o durante el transporte, lo que resulta en la aparición de síntomas como la pudrición y la necrosis interna de la pulpa una vez que la fruta alcanza su destino (Jaramillo Laverde et al., 2023).

1.5 Afectaciones post cosecha

El impacto derivado de *Colletotrichum* sp. es ampliamente reconocido como uno de los principales desafíos en el manejo poscosecha del aguacate, ya que resulta en una notable disminución en la calidad comercial del fruto. La manifestación inicial de esta problemática se evidencia a través de lesiones de color café claro en la unión entre el fruto y el pedúnculo, extendiéndose gradualmente hacia la base del aguacate. Este impacto no solo afecta la integridad física del aguacate, sino que también incide directamente en su calidad estética y, por ende, en su valor comercial. Además, se ha identificado una serie de factores adicionales que contribuyen a la disminución de la calidad durante las etapas de cosecha y poscosecha, tales como daños mecánicos, cambios en la epidermis del fruto y fisiopatologías asociadas a factores abióticos y bióticos. La adecuada gestión de estos aspectos se convierte en un imperativo para garantizar la competitividad del aguacate en los mercados internacionales y,

en última instancia, la rentabilidad de los productores (Jaramillo Laverde et al., 2023).

1.6 Composición del fruto de aguacate



28 |

EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE: SEGURIDAD, SOSTENIBILIDAD E INGENIERÍA COMPUTACIONAL

El aguacate (*Persea americana*) presenta una estructura con mesocarpio y endocarpio carnosos, rodeando una única semilla que constituye aproximadamente el 15 al 16% del peso total del fruto. Después del agua, las grasas son su componente principal, proporcionándole un alto valor calórico en contraste con otras frutas. Destaca por su elevado contenido de ácidos grasos insaturados, especialmente monoinsaturados, con un predominante 72% de ácido oleico, conocidos por su capacidad para reducir el colesterol total en la sangre. Abundante en vitamina E, ácido ascórbico, vitamina B6, β -caroteno, potasio y magnesio, el aguacate es muy apreciado en la elaboración de diversos productos alimenticios y farmacéuticos, así como en la extracción de grasas, pigmentos, fibra, proteínas y minerales. Su excepcional contenido de vitaminas A y B, junto con ciertas vitaminas liposolubles poco comunes en otros frutos. La composición, formación de metabolitos secundarios y características nutricionales de los aguacates pueden variar considerablemente, influenciadas por factores como el clima, el suelo, la temperatura, la humedad y la cantidad de lluvia durante el desarrollo del fruto, además de las diferencias genóticas entre las variedades (Ceballos & Montoya, 2013).

Anualmente, se genera una notable cantidad de aguacate, cuyo procesamiento produce una proporción considerable de subproductos, tales como cáscara y semilla, representando aproximadamente el 30% del peso fresco del fruto. Esta situación conlleva a la generación de subproductos que causan problemas ambientales y, en general, son desechados sin recibir ningún tipo de uso adicional. Por tanto, resulta pertinente explorar alternativas de aprovechamiento para estos residuos. A diferencia de otras frutas, el aguacate es notablemente bajo en azúcar y contiene aproximadamente un 80% de agua y fibra dietética (Zaldivar-Ortega et al., 2023). La distribución del peso total del fruto varía según el cultivar: aproximadamente un 66% corresponde a la pulpa, mientras que la semilla y la piel representan alrededor del 20% y el 14%, respectivamente (De Dios Ávila et al., 2023). En cuanto a la composición de las semillas, se observa que contienen entre un 52,7% y un 54,1% de humedad, un 1,2% de ceniza, alrededor de un 2,4% a un 2,5% de proteína, un 42,5% de extracto libre de nitrógeno, un 27,5% de carbohidratos y un 0,5% de grasa (Zaldivar-Ortega et al., 2023).



En la última década, se han llevado a cabo diversas investigaciones centradas en la valorización de las semillas de aguacate, que, a pesar de considerarse desechos, albergan una amplia gama de compuestos bioactivos de interés biotecnológico. Se destaca el potencial de la semilla para diversas aplicaciones como fuentes alternativas no convencionales de harinas, compuestos fitoquímicos, aceites, colorantes naturales y almidón. La semilla de aguacate, nutricionalmente valiosa, se equipará a otras partes de la planta en términos de fitoquímicos y nutrientes que la componen (De Dios Ávila et al., 2023).

Por otro lado, las cáscaras de aguacate presentan rangos variables en su composición, con un contenido de humedad que oscila entre un 65,7% y un 76,9%, un 0,75% a un 1,6% de ceniza, aproximadamente un 1,51% a un 6,3% de proteína, entre un 2,89% y un 11,04% de lípidos totales, un 20,8% de extracto libre de nitrógeno, y entre un 6,85% y un 56,9% de fibra (Zaldivar- Ortega et al., 2023). Adicionalmente se conoce que la cáscara de aguacate alberga una variedad de compuestos bioactivos, además de carbohidratos, proteínas, lípidos y fibras; dado que, se ha constatado que esta cáscara presenta un elevado contenido fenólico y actividad antioxidante, además posee efectivas propiedades antimicrobianas, antibióticas y antiinflamatorias. En este contexto, la cáscara de aguacate emerge como un material prometedor tanto para la producción de alimentos funcionales y productos farmacéuticos como para servir como fuente biológica en la elaboración de adsorbentes respetuosos con el medio ambiente. La distribución de la semilla, pulpa y cáscara del aguacate cultivado en la región de los Montes de María se observa en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2.
Proporción de epicarpio, mesocarpio y endocarpio del aguacate cultivado en el Carmen de Bolívar.

Aguacate cultivado en el Carmen de Bolívar, Colombia				
Estado poscosecha	Peso del fruto (g)	Epicarpio (%)	Mesocarpio (%)	Endocarpio (%)
Verde	478,8 ± 29,5	14,5 ± 2,8	65,3 ± 3,4	20,2 ± 0,6
Maduro	435,3 ± 27,3	7,3 ± 2,6	70,2 ± 2,6	22,0 ± 1,8
Sobremaduro	392,1 ± 8,9	10,5 ± 2,5	70,8 ± 5,5	18,6 ± 3,7

Nota: Adaptado de Robayo (2016).

La piel del aguacate se caracteriza por ser rica en clorofilas y antocianinas, otorgándole una tonalidad que va desde el verde claro hasta el oscuro. Se encontró que el aceite de aguacate obtenido por prensado en frío



exhibe una mayor concentración de carotenoides, clorofilas, compuestos fenólicos, y α -tocoferol en comparación con el obtenido mediante extracción con éter de petróleo, por tanto, este elevado contenido de carotenoides y clorofilas en el aceite de aguacate prensado en frío (Cervantes & Yahia, 2021). El mesocarpio o pulpa del aguacate exhibe una estructura celular peculiar, caracterizada por una capa moderadamente uniforme compuesta de células parenquimatosas (correspondiente al 97% del mesocarpio) de paredes delgadas y células idioblásticas de paredes gruesas. Tanto las células parenquimatosas como las idioblásticas desempeñan un papel en la producción de aceite. Los triacilgliceroles, que representan aproximadamente el 85% de los lípidos presentes en el mesocarpio del aguacate, se encuentran en forma de múltiples gotas pequeñas o cuerpos oleosos dispersos en todo el citoplasma de las células parenquimatosas. En contraste, en las células idioblásticas, se observa una gran gota de saco de aceite distribuida en todo el mesocarpio del aguacate (Tan, 2019).

1.7 Aceite de aguacate

Se ha reconocido la importancia crítica del contenido lipídico del aguacate, el cual se destaca por su alta proporción de aceite en comparación con otras frutas. Además, se cree que contiene niveles significativos de lípidos polares, como fosfolípidos y glicolípidos, que desempeñan un papel esencial en diversos procesos celulares en las membranas celulares. Investigaciones adicionales han revelado la presencia de ácidos grasos monoinsaturados en el aguacate, los cuales se consideran beneficiosos para reducir los niveles de lipoproteínas de baja densidad (LDL) y aumentar los niveles de lipoproteínas de alta densidad (HDL), contribuyendo así a la salud cardiovascular. El contenido de tocoferol del aceite de aguacate varía según la variedad, el estado de maduración y el modo de deshidratación. Los productos de aguacate también contienen minerales como magnesio, fósforo, calcio, potasio y sodio, así como otros minerales como zinc y hierro que están presentes en cantidades inferiores a 1 mg por gramo de peso fresco de aguacate, así mismo, los altos niveles de potasio y las cantidades mínimas de sodio son beneficiosos para las personas con dietas bajas en sodio y protegen contra las enfermedades cardiovasculares. Los productos contienen vitaminas, como β -caroteno, retinol, vitamina E, ácido ascórbico, riboflavina, tiamina, ácido fólico, niacina y piridoxina (Nyakang'i et al., 2023). Con su alto contenido de vitamina E y su capacidad excepcional para penetrar en la piel, el aceite de aguacate se ha convertido en una materia prima esencial en la industria cosmética (Mgoma et al., 2021).

1.8 Calidad del aceite de aguacate

Rydlewski et al. (2020) plantean que los MUFAs del aguacate, especialmente el ácido oleico, son beneficiosos para la piel, según estudios previos; en consecuencia, los productos cosméticos con etiquetas saludables han ganado popularidad y muchos de ellos, incluyendo aceite de aguacate, han sido aprobados por la FDA. Debido a su precio más alto y a los beneficios que ofrecen para la piel, los productos de aceite de aguacate son susceptibles a la adulteración, un problema común en el comercio de aceites, donde se agregan aceites más baratos con el fin de obtener mayores ganancias. Por lo tanto, es crucial mantener la autenticidad de estos productos para garantizar su efectividad terapéutica. La adulteración de aceites, un problema en el comercio, puede afectar la calidad de productos como el aceite de aguacate, valorado por sus beneficios para la piel.

| 31



1.9 El caso de los Montes de María

En los Montes de María, región del departamento de Bolívar, se cultiva la variedad de aguacate criollo-antillano; sin embargo, en los últimos años, se ha identificado una problemática debido a la acumulación de desechos agrícolas y la filtración de sustancias contaminantes que afectan negativamente el aire, el agua y el suelo de la región. Lo anterior se presenta como consecuencia de diversos factores asociados al cultivo, entre ellos la presencia de hongos que conlleva al deterioro de la salud de los árboles de aguacate y la descomposición de sus raíces. Adicionalmente, se suman a la problemática las deficientes condiciones de las vías de acceso y la falta de estrategias adecuadas para la comercialización, estandarización y buenas prácticas agrícolas en la zona (Herrera-Rodríguez et al., 2023).



CAPÍTULO 2

AVANCES EXPERIMENTALES: TÉCNICAS DE EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE AGUACATE

| 33



En los últimos años la extracción de aceite de aguacate ha alcanzado gran importancia debido a su creciente demanda en las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica. Este aceite tiene un alto contenido en ácidos grasos monoinsaturados y antioxidantes que son beneficiosos para la salud. Sin embargo, la eficiencia y la calidad del proceso de extracción son fundamentales para maximizar su rendimiento y preservar sus propiedades nutricionales y organolépticas. En la literatura se han reportado distintas investigaciones sobre el aprovechamiento del aguacate para la producción de productos de valor agregado, tales como el aceite.

A nivel internacional se reportan investigaciones sobre la obtención de productos a partir de la pulpa del aguacate, Green y Wang (2022), realizaron la extracción de aceite mediante técnicas físicas usando aguacates completos y solo el mesocarpio, de acuerdo con los resultados se observó que al usar todo el fruto se obtiene un alto contenido de fenoles. En Páramos et al. (2020), usaron la cáscara y semilla de aguacate para la obtención de aceite con el fin de aprovechar estos residuos. La extracción de aceite se llevó a cabo mediante soxhlet usando etanol como solvente y alcanzando un rendimiento del 10,3 % para semilla y 14 % para la cáscara de aguacate, respectivamente. Por su parte, la extracción con fluidos supercríticos con CO_2 como solvente alcanzó una eficiencia de 6,9 % para la semilla y 5,3 % para la cáscara. Xuan (2019), empleó la pulpa del aguacate (meso-



carpio) para la obtención de aceite, observando que el aceite extraído tiene altos niveles de ácidos grasos monoinsaturados (MUFA), así mismo, plantea que dependiendo el método de extracción es necesario retirar humedad de la pulpa. Knothe (2013), obtuvo y caracterizó ésteres metílicos, biodiesel y aceites, logrando obtener ésteres metílicos de gran calidad. De acuerdo con el perfil de ácidos grasos se obtuvo un 58,6 % de ácido oleico, 0% de azufre y una viscosidad cinemática de 4,42, por este aceite puede ser empleado como combustible. En Guatemala, Bressani (2009), comparó las variedades de aguacate obteniendo de 52,8 a 57,7 % de grasa en la pulpa, también observó que algunas semillas de variedades criollas contienen alrededor de 6,7 % de lípidos. Lee et al. (1983), investigaron el contenido de lípidos de varias especies de aguacate de los Estados Unidos, obteniendo un contenido de lípidos del mesocarpio para el aguacate Hass de 19,8 %, Bacon de 19,4 %, “Strong” de 19,1 %, Pinkerton de 18,9 %, Zutano de 18,4 %.

A nivel nacional se han desarrollado estudios sobre la producción de aceite de aguacate. López et al. (2021) extrajeron aceite de aguacate Hass a diferentes temperaturas mediante reactores con agitación y prensado hidráulico. El máximo rendimiento de extracción fue de 77,6 % al trabajar el reactor a una temperatura de 48,9 °C y una velocidad de agitación de 49,7 rpm durante 92,6 minutos. De igual forma, Dávila et al. (2017), desarrollaron una biorrefinería de aguacate Hass obteniendo diferentes productos tales como compuestos fenólicos, alcohol, etanol, aceite y xilitol. Se identificó que el principal ácido graso presente en la pulpa fue el oleico, alrededor de 51 %. Por su parte, Piedrahita y Cardona (2021), implementaron una biorrefinería a pequeña escala que usa como biomasa residuos de aguacate y plátano en Colombia, como una alternativa para disminuir la dependencia a los combustibles fósiles. En este capítulo, se explorarán los avances experimentales en la extracción de aceite de aguacate, abordando técnicas convencionales y las desarrolladas recientemente. Además, se hablará acerca de los métodos de caracterización del aceite de aguacate, como color, acidez, índice de yodo, entre otros.

2.1. Técnicas de extracción de aceite

2.1.1. Extracción Soxhlet

Las técnicas básicas para la extracción de grasas y aceites de matrices de semillas se basan principalmente en la selección del solvente, incluido el uso de calor y agitación (Luque de Castro y Priego, 2010). En comparación

con otras técnicas, la extracción Soxhlet y la extracción por reflujo térmico son procesos distintos. La extracción por reflujo de calor se puede realizar simplemente hirviendo el material en el disolvente, donde se utiliza una superficie fría para condensar los vapores del disolvente a medida que se evaporan y devolverlos a un estado líquido en el recipiente. La extracción Soxhlet, por otro lado, sirve para separar partes que son solubles en un solvente (Danlami et al., 2014).

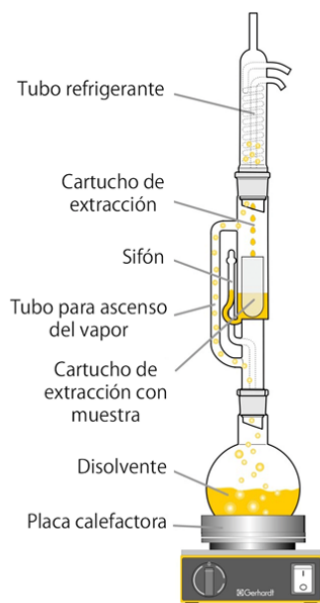
En este sentido, los materiales de semilla (sólidos) se colocan en el soporte del dedal y se llenan con disolvente fresco condensado de un matraz de destilación. Cuando el líquido alcanza un nivel de desbordamiento, un sifón aspira la solución del dedal y la descarga en el matraz de destilación, transportando los solutos extraídos a la mayor parte del líquido. En el matraz de disolvente, los solutos se separan del disolvente mediante destilación. Los solutos se dejan en el matraz y el disolvente nuevo pasa al lecho sólido. La operación se repite hasta lograr la extracción completa (Danlami et al., 2014). Cabe destacar que, se debe seleccionar un disolvente de extracción apropiado para la extracción del componente objetivo utilizando la técnica de extracción Soxhlet. Diferentes solventes producirán extractos y composiciones de extractos completamente diferentes (Zarnowski y Suzuki, 2004).

La extracción Soxhlet es una técnica híbrida continua-discontinua. Dado que el solvente actúa por etapas, el conjunto puede considerarse como un sistema discontinuo; sin embargo, como el solvente se recircula a través de la muestra, el sistema también tiene una característica continua (López-Bascón y De Castro, 2020). Ahora bien, el disolvente más utilizado para la extracción de aceites comestibles de origen vegetal es el hexano. Esto se debe a su baja temperatura de ebullición y fácil recuperación y a que la mayoría de los aceites son solubles en hexano. La desventaja del n-hexano es su peligroso nivel de contaminación del aire. Por esta razón, el uso de solventes alternativos como isopropanol, etanol, hidrocarburos y agua ha aumentado debido a consideraciones ambientales, de salud y de seguridad (Mamidipally y Liu, 2004).



**Figura 2.1.**

Esquema del método de extracción Soxhlet.

**Nota:** Gerhardt (s.f.).

La extracción Soxhlet, que ha sido el método de extracción más antiguo, es la técnica más referenciada para evaluar el rendimiento de otros métodos de extracción sólido-líquido, excepto en campos de aplicaciones restringidos, como la extracción de compuestos termolábiles (Luque de Castro y Priego, 2010). El d-limoneno extrae una cantidad considerablemente mayor de aceite que el hexano en cualquier conjunto de condiciones dadas. A un PH de 12, se utiliza agua (H_2O) para extraer el aceite de salvado de arroz (Hanmoungjai et al., 2000). El aceite extraído usando el medio acuoso tiene un menor contenido de ácido graso libre (FFA) y color que el aceite extraído usando hexano. Los costos de solventes alternativos como la acetona y el etanol pueden ser más altos. Comúnmente se agrega un cosolvente para aumentar la polaridad de la fase líquida. Se ha informado que una mezcla de solventes como isopropanol y hexano aumenta el rendimiento y la cinética de la extracción (Li et al., 2004).

Las ventajas más destacadas de la SE son: (1) la muestra se pone en contacto repetidamente con porciones nuevas del solvente, lo que ayuda a desplazar el equilibrio de transferencia de masa; (2) la temperatura del sistema permanece relativamente alta ya que el calor aplicado al matraz



de destilación llega en cierta medida a la cavidad de extracción; (3) no se requiere filtración después del paso de lixiviación; y (4) el rendimiento de la muestra se puede aumentar mediante extracción paralela simultánea porque el equipo básico es económico (López-Bascón y De Castro, 2020). Los inconvenientes más serios de la SE en comparación con otras técnicas convencionales para la preparación de muestras sólidas son: (1) el largo tiempo requerido para la extracción y la gran cantidad de desechos del solvente, que no sólo es costoso de eliminar, sino que también puede causar adicionales problemas ambientales; (2) las muestras generalmente se extraen en el punto de ebullición del solvente durante un largo período de tiempo y no se puede ignorar la posibilidad de descomposición térmica de compuestos termolábiles; (3) el extractor Soxhlet convencional no puede proporcionar agitación, lo que aceleraría el paso; (4) debido a la gran cantidad de disolvente utilizado, es obligatoria una etapa de evaporación/concentración después de la extracción; y (5) la técnica está restringida a la selectividad de disolventes y no se automatiza fácilmente (López-Bascón y De Castro, 2020).

2.1.2. Extracción Asistida por Microondas

MAE transfiere energía al disolvente calentado, como metanol o una mezcla de metanol/agua para compuestos polares, y hexano para compuestos no polares, mediante mecanismos gemelos de rotación dipolar y conducción iónica. El objetivo del calentamiento por microondas, en la mayoría de los casos, son los materiales vegetales secos; sin embargo, las células vegetales todavía contienen trazas de humedad. La humedad, cuando se calienta dentro de la célula vegetal debido al efecto del microondas, se evapora, genera alta presión en la pared celular y produce hinchazón de la célula vegetal. Esto empuja, estira y, en consecuencia, rompe la pared celular (Vivekananda et al., 2007).

Durante el proceso se produce una exudación de la sustancia química que se encuentra en la célula hacia los disolventes circundantes. Este mecanismo de exposición de la muestra al disolvente no es diferente del de la extracción por calor-reflujo que depende sólidamente de los procesos de permeación y solubilización para sacar los analitos de la matriz. Adicionalmente, se han observado cambios destructivos en la piel de naranja como resultado del tratamiento con microondas mediante micrografías electrónicas de barrido (Kratchanova et al., 2004). La tecnología de extracción MAE se ha aplicado tanto a nivel de laboratorio como a operaciones indus-

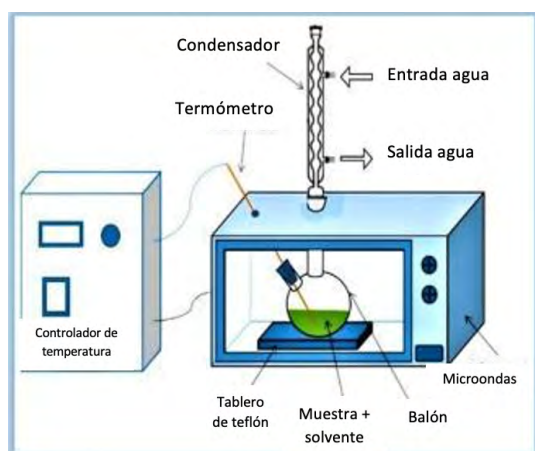


triales a gran escala, es decir, aplicaciones de extracción comercializadas a gran escala (Ying et al., 2013). Cabe resaltar que, la tecnología MAE se ha utilizado para aislar aceites, grasas y aceites esenciales (Bayramoglu et al., 2008).

Se hace referencia a un microondas como una radiación electromagnética no ionizante que tiene una frecuencia de 300 MHz a 300 GHz (Vivekananda et al., 2007). Hay dos tipos de sistemas MAE, el de contenedor cerrado y el de contenedor abierto. Los recipientes cerrados son para la extracción de compuestos objetivo en condiciones de alta temperatura y presión, mientras que los sistemas de recipientes abiertos son para extracciones realizadas en condiciones de presión atmosférica (Kaufmann y Christen, 2002).

Figura 2.2.

Esquema de extracción asistida por microondas.



Nota: Bisht et al. (2025).

Ahora bien, los enlaces de la celulosa (el componente principal de la pared celular vegetal) se rompen (hidrolizan) a altas temperaturas alcanzadas por la radiación de microondas y se convierten en fracciones solubles en 1 a 2 minutos. El logro de una temperatura más alta por parte de la pared celular durante el MAE conduce a la deshidratación de la celulosa y, por lo tanto, reduce su resistencia mecánica y también mejora el movimiento del solvente hacia los compuestos dentro de la célula (Latha, 2000). Un factor importante que afecta la extracción es la selección del disolvente adecuado. La elección del disolvente se basa principalmente en la solubilidad

del analito requerido, la capacidad del disolvente para interactuar con la matriz y su absorbancia de microondas (Chen et al. 2008). El disolvente seleccionado debe tener una alta selectividad del analito de interés sobre los componentes de la matriz y debe ser compatible con pasos analíticos cromatográficos adicionales.

En esta técnica de extracción se facilita la lixiviación de componentes activos desde las células al disolvente, mejorando así el rendimiento del aceite. Este fenómeno podría intensificarse a medida que el disolvente se impregna en la matriz vegetal, con una alta eficiencia de calentamiento del microondas (Latha, 2000). Considerando otras técnicas de extracción, en un intento por mejorar el rendimiento de Soxhlet, el más exitoso ha sido el uso de microondas, que ha proporcionado una variedad más amplia de enfoques. De hecho, la extracción Soxhlet asistida por microondas sigue siendo la mejora más interesante de la extracción Soxhlet convencional (Li et al., 2006).

Por otro lado, en cuanto a los solventes empleados, los disolventes transparentes no se calientan en el microondas y aquellos con alta capacidad de absorción se calientan más rápido para mejorar la extracción. Se hace referencia al hexano como un disolvente transparente del microondas, mientras que el etanol se considera un excelente disolvente absorbente de microondas. Los investigadores han utilizado mezclas de disolventes de alta y baja absorción en microondas para obtener rendimientos de extracción óptimos. Debe haber suficiente solvente para sumergir la matriz vegetal durante todo el proceso de irradiación. En la extracción convencional, un mayor volumen de disolvente en la matriz sólida produce mayores rendimientos de extracción, mientras que, en MAE, un mayor volumen de disolvente podría no dar un mayor rendimiento debido a la falta de uniformidad y la exposición a las microondas (Danlami et al., 2014).

La técnica MAE es una posibilidad viable para la extracción de aceites esenciales, grasas y aceites de semillas debido a sus distintos beneficios sobre las técnicas de extracción con solventes (Cintas et al., 2013). Este método es comparable con otras técnicas de extracción modernas alternativas debido a su simplicidad y bajo costo de equipo. Otros beneficios de esta técnica de extracción incluyen los siguientes: (1) tiempo de extracción reducido; (2) permitir un uso sencillo, rápido y con poco disolvente; (3) capacidad para agregar reactivos durante el tratamiento; (4) reacción de extracción controlada por control de temperatura y presión; (5) en aplica-





ciones de procesamiento, capacidad de cerrar instantáneamente la fuente de calor, lo que marca una enorme diferencia en la calidad del producto y, por tanto, en la economía de producción; (6) se procesa un mayor volumen de materia prima durante un período determinado; (7) seguro, sin peligro potencial; (8) calentamiento selectivo de la mezcla de disolventes de muestra; y (9) uso de la tecnología para reacciones químicas como la hidrólisis (Danlami et al., 2014).

En comparación con otras técnicas de extracción modernas, (1) se requiere una etapa adicional (filtración o centrifugación) para la eliminación de residuos sólidos (Shah y Rohit, 2013). Además, (2) la eficiencia de las microondas puede ser muy pobre cuando los compuestos objetivo son no polares o volátiles. Por otro lado, (3) no es adecuado para su uso cuando se consideran compuestos sensibles al calor porque se desnaturalizan. (4) La recuperación del analito es baja, (5) el uso de alta presión puede provocar una explosión y (6) se necesitan largos tiempos de enfriamiento o ventilación después del proceso de extracción (Danlami et al., 2014).

2.1.3. Extracción Asistida por Ultrasonido

Los efectos mecánicos de los ultrasonidos permiten una mayor penetración en los materiales celulares y, por tanto, mejoran la transferencia de masa. El ultrasonido altera las paredes celulares biológicas para facilitar la liberación del contenido. Por lo tanto, la alteración celular y la transferencia de masa efectiva se citan como factores importantes que mejoran la extracción con potencia ultrasónica. Además, el ultrasonido permite cambios en las condiciones de procesamiento como una disminución de la presión y la temperatura respecto de las utilizadas en otras técnicas de extracción, lo que permite la extracción de compuestos termolábiles (Shah y Rohit, 2013). Hay dos tipos de equipos de ultrasonido que se pueden utilizar con fines de extracción, un baño de agua ultrasónico y un sistema de sonda ultrasónica acoplada a transductores de bocina (Ibáñez et al., 2012). La tecnología de extracción de UAE se ha utilizado desde el nivel de laboratorio hasta operaciones industriales de mayor escala, para aplicaciones de extracción comercializadas (Chemat et al., 2011).

Las ondas ultrasónicas se consideran ondas sonoras de alta frecuencia por encima del oído humano, es decir, por encima de 20 kHz. Estas ondas se propagan por rarefacciones y compresión. Esta expansión provoca una presión negativa en el líquido. Si la presión excede la resistencia a la

tracción del líquido, se forman burbujas de vapor. Estas burbujas de vapor sufren un colapso implosivo en los campos de ultrasonido, lo que se denomina cavitación (Luque-García y Luque de Castro, 2003).

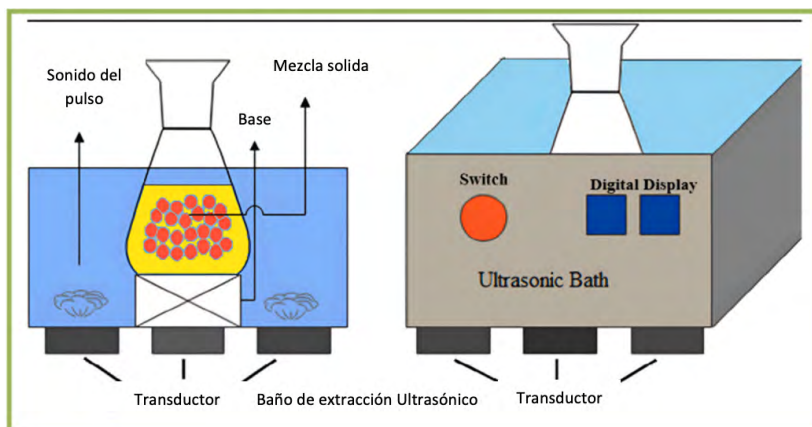
Con el ultrasonido, el efecto de la temperatura sobre el rendimiento es insignificante en el rango de 313 a 333 K, por lo que la extracción óptima se produce en el rango de temperatura de 313 a 333 K (Danlami et al., 2014). Por lo tanto, el uso de UAE es aconsejable para dos compuestos, que pueden verse alterados en condiciones operativas de extracción Soxhlet y de reflujo térmico debido a la alta temperatura de extracción (Romdhane & Gourdon, 2002). Los estudios sobre el impacto de varios solventes y sus mezclas, el impacto del volumen de solvente, el tiempo de sonicación y la potencia indicaron que la UAE tienen el potencial de mejorar la eficiencia de extracción y también de reducir el tiempo de procesamiento, y la composición del aceite no se desnaturaliza mediante el uso de ultrasonido (Danlami et al., 2014).

La técnica UAE es una alternativa sencilla, rentable y eficiente en comparación con las técnicas de extracción tradicionales. Los beneficios de utilizar ultrasonido en la extracción sólido-líquido son aumentar el rendimiento de la extracción y fijar la cinética. El ultrasonido facilita la extracción de compuestos térmicamente sensibles. Los costes de los equipos son inferiores a los de otras nuevas técnicas de extracción alternativas. Podría usarse con una variedad más amplia de solventes, incluida la extracción acuosa, para componentes solubles en agua y otros solventes como etanol y metanol (Chemat et al., 2011). En comparación con los métodos de extracción Soxhlet, la extracción por ultrasonido puede mejorar la eficiencia y la tasa de extracción, reducir la temperatura de extracción y aumentar la gama de disolventes elegidos (Vilkhu et al., 2008). Las deficiencias incluyen la atenuación de las ondas en la fase dispersa y una disminución de la amplitud de las ondas sonoras con la distancia, lo que supone un gran desafío para las tecnologías de la técnica UAE. De hecho, la zona de ultrasonidos activada está restringida a una zona limitada en la proximidad del emisor de ultrasonidos. Estos factores deben considerarse cuidadosamente en el diseño de los equipos para aplicar la técnica UAE (Danlami et al., 2014).



**Figura 2.3.**

Esquema de la extracción asistida por ultrasonido.



Nota: Bisht et al. (2025).

2.1.4. Extracción con Líquidos Presurizados

PLE se conoce también como extracción acelerada con solventes, extracción con fluidos a presión, extracción con solventes a alta presión y extracción mejorada con solventes (Nieto et al., 2010). En algunos casos, se emplea agua caliente a presión como disolvente para la extracción en lugar de un disolvente orgánico. Este método se llama extracción con agua caliente a presión o extracción con agua subcrítica (Eskilsson et al., 2004).

En este sentido, el equipo PLE involucra una celda de extracción donde se introduce la muestra. La celda se llena con un solvente que se calienta. Luego se mantienen altas temperaturas y presión para facilitar una extracción más rápida. El equipo tiene una válvula de alivio de presión que protege contra la sobrepresurización de la celda. Cabe resaltar que, se utiliza nitrógeno para purgar todos los disolventes residuales al final de la extracción (Kaufmann y Christen, 2002). Ahora bien, un solvente ideal para la extracción de aceite de semillas incluye un alto coeficiente de partición y alta selectividad con respecto al compuesto de interés, una gran capacidad de extracción, ausencia de reacciones irreversibles entre el solvente y el aceite, y facilidad de recuperación del aceite (Gertenbach, 2002). Los principales factores por considerar para una extracción óptima son los mecanismos de transferencia de masa, las características de las semillas y el costo de los solventes (Waldeback, 2005).



Las condiciones de temperatura y presión utilizadas en PLE están dentro de los rangos de 323 a 473 K y 3,5 a 20 MPa, respectivamente. La presión elevada hace que la temperatura del disolvente aumenta por encima de la temperatura normal del punto de ebullición. El aumento de temperatura tiende a acelerar la tasa de extracción al aumentar la solubilidad y la tasa de transferencia de masa. Además, el aumento de temperatura reduce la viscosidad y la tensión superficial de los disolventes, lo que ayuda a que se distribuyan uniformemente sobre la matriz biológica y mejore la tasa de extracción (Danlami et al., 2014).

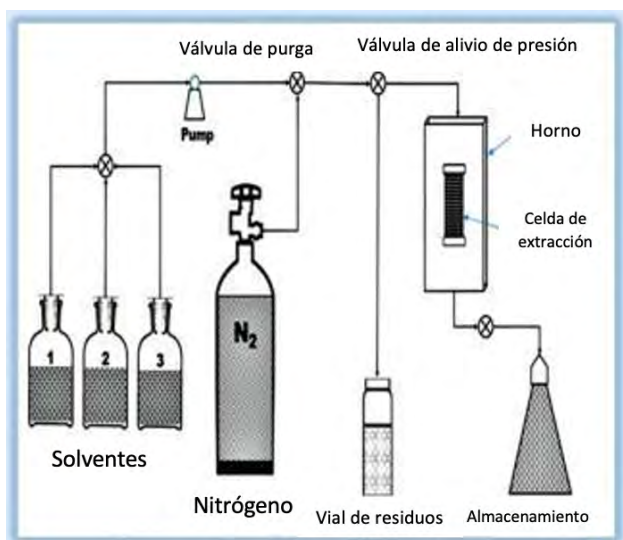
El disolvente de extracción, la temperatura, la presión, el número de ciclos y el tiempo influyen en el rendimiento y la velocidad de extracción (Nieto et al., 2010). De hecho, se ha reportado que las semillas oleaginosas como canola, maíz, lino, algodón, soja, etc., se extraen en poco tiempo, con mayor rendimiento y mejor calidad a través de PLE en comparación con los métodos tradicionales, como la extracción Soxhlet (Danlami et al., 2014).

Los beneficios de PLE incluyen los siguientes: (1) se logra una mejor cinética de extracción debido al aumento de la temperatura de funcionamiento; (2) los parámetros operativos se pueden cambiar para aumentar la selectividad; (3) la precisión y reproducibilidad son mejores en comparación con los métodos convencionales; (4) el nitrógeno inerte reduce el riesgo de oxidación en comparación con los procesos de extracción convencionales; (5) el método de solicitud es relativamente sencillo; (6) hay menos tiempo de extracción y menor consumo de disolvente; y (7) la automatización es posible y más fácil en comparación con otras técnicas de extracción. El método también utiliza solventes de extracción no tóxicos como CO_2 y agua, lo que tiene beneficios económicos y ambientales (Mustafa & Turner, 2011). El PLE se considera una posible alternativa para la extracción de compuestos polares (Brachet et al., 2001).

Los inconvenientes incluyen los siguientes: (1) la extracción se realiza a alta temperatura; en consecuencia, conducirá a una degradación térmica, especialmente de los compuestos termolábiles en los extractos; (2) la selectividad se logra únicamente variando el tipo de solvente, lo que tiende a ser exhaustivo y, por lo tanto, puede conducir a extracciones no selectivas (Ibáñez et al., 2012); (3) es necesaria una limpieza posterior a la extracción; y (4) normalmente se utiliza sólo con fines analíticos (Danlami et al., 2014).

**Figura 2.4.**

Esquema de extracción con líquidos presurizados.



Nota: Bisht et al. (2025).

2.1.5. Extracción por Fluidos Supercríticos

La tecnología de fluidos supercríticos es reconocida como una técnica eficaz que se ha utilizado a nivel de laboratorio, a escala preparatoria, a escala piloto y hasta la producción comercial industrial a mayor escala, con una alta eficiencia comparable a la de los procedimientos de análisis químicos existentes (Sehana et al., 2009). SFE es aplicable para la identificación cualitativa y cuantitativa de constituyentes de productos naturales, incluidos compuestos termolábiles (Mohamed & Mansoori, 2002).

SFE implica cinco pasos secuenciales: (1) penetración y difusión del disolvente dentro de la matriz sólida; (2) solubilización y descomposición de los componentes; (3) transporte de solutos a través del sólido, con formación de películas delgadas alrededor de las partículas sólidas; (4) transporte de soluto desde la superficie externa del sólido a la mayor parte del fluido a través de un medio convectivo; y (5) separación y descarga del extracto y del sólido (Danlami et al., 2014). Cabe destacar que, el costo inicial de las operaciones de SFE es alto debido al alto costo fijo que implica el equipo de alta presión comúnmente compuesto de costoso acero inoxidable, lo que se ha señalado como un inconveniente importante de la instalación de una unidad industrial de SFE (Meireles, 2008).

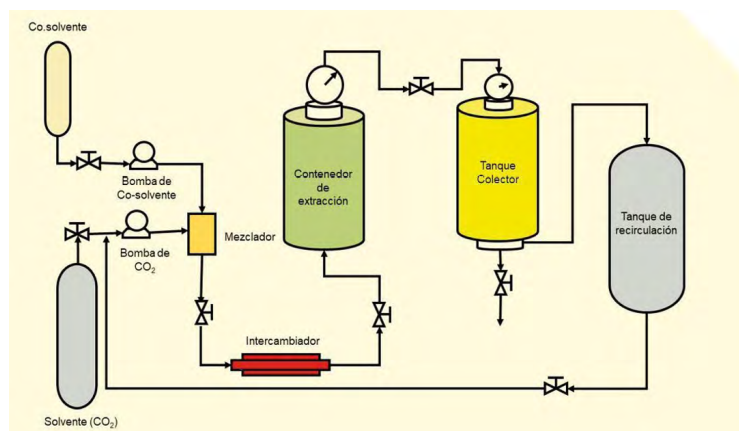


El disolvente de extracción en este proceso es un fluido (gas denso) a una temperatura y presión superiores a los valores críticos, T_c y P_c . En SFE, varios factores como la temperatura, la presión, el volumen de la muestra, la adición de cosolvente y el control de flujo y presión juegan un papel vital durante la extracción mediante SFE (Higuera-Ciapara et al., 2005). En condiciones que son bastante más altas que la temperatura y presión críticas, los fluidos supercríticos exhiben propiedades intermedias a las de las fases líquida y gaseosa. Este fluido posee propiedades limitadas por los extremos de los estados gaseoso y líquido, y estas propiedades podrían ajustarse con la alteración de la presión y temperatura aplicadas (Kroon y Raynie, 2010). Para el agua y el CO_2 , por ejemplo, las condiciones críticas de temperatura (T_c) y presión (P_c) son 647 K y 220 atm y 303,9 K y 73,8 atm, respectivamente (Evans, 2002).

El rendimiento de extracción mejora significativamente al aumentar la presión, como resultado del aumento en la solubilidad de los componentes del aceite (Guan et al., 2007). La influencia de la temperatura en la extracción es mucho más difícil de predecir que la de la presión debido a sus efectos contrarios en el rendimiento del aceite. Los modificadores, como el agua, el metanol y el etanol, tienen la ventaja de inducir el hinchamiento de la matriz, mejorando así el acceso a sitios más remotos del interior de la matriz (Kim et al., 2008). Se ha informado que la adición de un modificador aumenta el rendimiento del analito de interés hasta tres veces (Wang et al., 2001).

Figura 2.5.

Esquema de la extracción por fluidos supercríticos.



Nota: García y Barba (2019).



Entre las ventajas del SFE se destacan: (1) el dispositivo se puede montar a partir de piezas fácilmente disponibles, (2) el método de muestreo es simple, (3) se pueden obtener grandes cantidades de datos en poco tiempo, (4) se pueden obtener datos de equilibrio y fraccionamiento, y (5) la medición del caudal de CO_2 se puede obtener con un simple medidor de flujo de gas en la salida (Gupta & Jae-Jin, 2006). Entre las desventajas se encuentran las siguientes: (1) El método se ve afectado por la tasa de transferencia de masa entre el fluido y el soluto (2) Los solutos pesados también pueden obstruir el limitador de salida, lo que puede causar que el soluto se retenga, lo que resulta en una cantidad menor de soluto recolectada. (3) El arrastre de gotas de soluto puede ocurrir a velocidades de flujo altas, lo que resulta en una mayor recolección de soluto en la trampa. (4) A presiones más altas, si la densidad de SC-CO_2 es mayor que la del soluto, el soluto flota y es empujado fuera de la columna, lo que resulta en una mayor recolección de soluto en la trampa en comparación con la cantidad de equilibrio. (5) Cuando se utiliza una mezcla de solutos, se debe tener cuidado de no agotar uno de los componentes (Gupta & Jae-Jin, 2006).

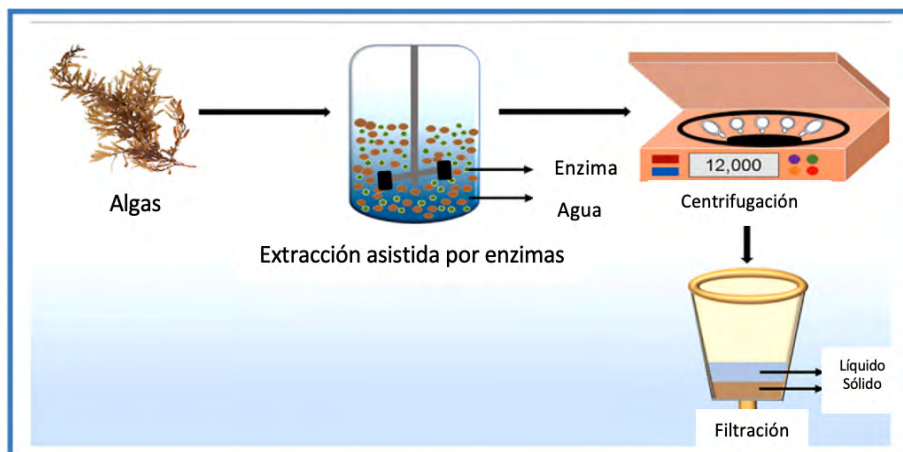
2.1.6. Extracción enzimática

La extracción enzimática es un proceso que utiliza enzimas para separar los componentes deseados de un sustrato, como en la extracción de aceites de semillas oleaginosas. Este método implica la adición de enzimas específicas que actúan sobre los enlaces químicos presentes en el material de interés, facilitando la liberación de los compuestos deseados, como los aceites, de manera más eficiente y selectiva que los métodos convencionales de extracción (Gao et al., 2023). Por ejemplo, se ha investigado la extracción enzimática de aceites de semillas como la soja y el ricino, demostrando su potencial en la obtención de aceites de alta calidad (Díaz-Suarez et al., 2021; Dickey et al., 2008).

A pesar de lo anterior, la extracción enzimática presenta desventajas entre las que se encuentran altos costos asociados con la producción y purificación de enzimas, así como la necesidad de condiciones específicas de pH y temperatura para que las enzimas sean efectivas (Dickey et al., 2008). Además, la eficiencia de la extracción enzimática puede variar dependiendo de factores como la naturaleza del sustrato y la actividad enzimática (Souza et al., 2019). A pesar de estas limitaciones, la extracción enzimática sigue siendo un área de investigación prometedora en la búsqueda de métodos más sostenibles y eficientes para la obtención de aceites y otros compuestos de interés.

Figura 2.6.

Esquema de la extracción enzimática.



Nota: Bisht et al. (2025).

2.1.7. Extracción por tecnología de membranas

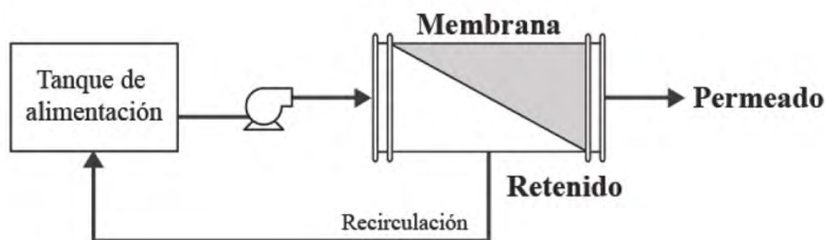
El proceso de extracción de aceite utilizando membranas implica el uso de membranas especiales que pueden separar el aceite de otras sustancias presentes en la mezcla, como el agua. Estas pueden ser diseñadas para ser súper hidrofóbicas y superoleofílicas, lo que significa que son altamente repelentes al agua y atraen selectivamente al aceite (Semilin et al., 2021). Esta selectividad permite una separación eficiente del aceite de otras sustancias, lo que puede resultar en una extracción más pura y de mayor calidad del producto deseado (Lee et al., 2013).

Una ventaja significativa del proceso de extracción de aceite utilizando membranas es su capacidad para lograr una separación selectiva y eficiente del aceite de otras sustancias presentes en la mezcla. Las membranas más utilizadas para la extracción de aceites son las membranas de polímero, generalmente de poliestireno electro hilado (Lee et al., 2013; Semilin et al., 2021). Sin embargo, una posible desventaja es que este método de extracción de aceite puede requerir una inversión inicial significativa en tecnología y equipos especializados. Además, el mantenimiento y la operación de las membranas pueden ser costosos (Semilin et al., 2021). Además, la eficiencia del proceso de membranas puede depender de varios factores, como la calidad de las membranas utilizadas y las condiciones de operación.



**Figura 2.7.**

Esquema de la extracción por tecnología de membranas.



Nota: Solís et al. (2017).

2.1.8. Extracción por campos eléctricos pulsados

La tecnología de campos eléctricos pulsados (PEF, por sus siglas en inglés) es una técnica de procesamiento no térmico emergente que aplica pulsos de alto voltaje con duraciones que van desde microsegundos hasta milisegundos sobre materiales biológicos de origen vegetal, animal o microbiano. Esta aplicación genera un campo eléctrico dentro de una cámara de tratamiento situada entre dos electrodos, cuya intensidad depende principalmente del voltaje aplicado, la geometría de los electrodos y la distancia entre ellos. El sistema puede operar en modo continuo o discontinuo, e incluye un generador de pulsos, un sistema de control y una cámara de tratamiento de diversas configuraciones (Janahar et al., 2022).

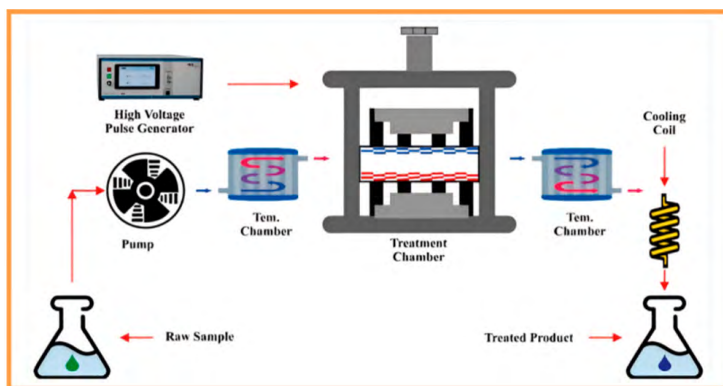
El PEF actúa generando electroporación en las membranas celulares, aumentando su permeabilidad y permitiendo la liberación de compuestos intracelulares sin aplicar calor excesivo. Esta característica permite preservar mejor las propiedades nutricionales y sensoriales de los alimentos, a diferencia de los procesos térmicos convencionales (Ferraz & Silva, 2025; Ramaswamy & Bala Krishnan, 2024). Entre los parámetros operativos más relevantes se encuentran la intensidad del campo eléctrico, la frecuencia, la forma y duración de los pulsos, así como la energía específica aplicada, todos los cuales influyen en la eficiencia del tratamiento y en su impacto sobre el producto procesado (Ferraz & Silva, 2025). Debido a su bajo consumo energético, su capacidad para operar a temperaturas moderadas y su potencial para preservar los nutrientes sensibles al calor, el PEF se considera una herramienta tecnológica clave para el desarrollo de procesos más sostenibles e innovadores en el ámbito agroalimentario e industrial.



El PEF tiene múltiples aplicaciones, tanto en la industria alimentaria como en otros sectores. En la industria alimentaria se emplea en la pasteurización de alimentos líquidos y semisólidos como jugos, leche, huevo líquido, yogur y purés, logrando inactivación microbiana sin afectar la calidad sensorial (Janahar et al., 2022). También se ha usado en la extracción de compuestos bioactivos y aceites esenciales, aumentando los rendimientos y reduciendo el uso de disolventes, el tiempo de extracción y la temperatura del proceso (Ferraz & Silva, 2025; Ramaswamy & Bala Krishnan, 2024). Otra de sus aplicaciones comprende el pretratamiento en procesos de deshidratación, mejorando la eficiencia y calidad de frutas, verduras y tubérculos como la papa, lo que se traduce en menor absorción de aceite y mejor textura en productos fritos (Yu et al., 2018). Por otro lado, se ha usado PEF en el tratamiento de aguas residuales, ablación de tumores, mejora de la germinación de semillas, y sistemas de liberación controlada de fármacos, gracias a su efecto específico sobre las membranas celulares (Ramaswamy & Bala Krishnan, 2024).

Figura 2.8.

Esquema de la extracción por campos eléctricos pulsados.



Nota: Bisht et al. (2025).

2.1.9. Extracción por calentamiento óhmico

El calentamiento óhmico (OH) es una tecnología de calentamiento volumétrico basada en el paso de corriente eléctrica a través de materiales con resistencia eléctrica inherente, lo que genera calor de manera interna y uniforme (Valderrama Gutiérrez, 2018). Esta técnica difiere de los métodos tradicionales de calentamiento por conducción o convección, ofreciendo ventajas como una mayor rapidez, uniformidad térmica y eficiencia energética, lo que la convierte en una alternativa prometedora para diversos procesos



industriales, especialmente en el sector de alimentos (Gavahian et al., 2020).

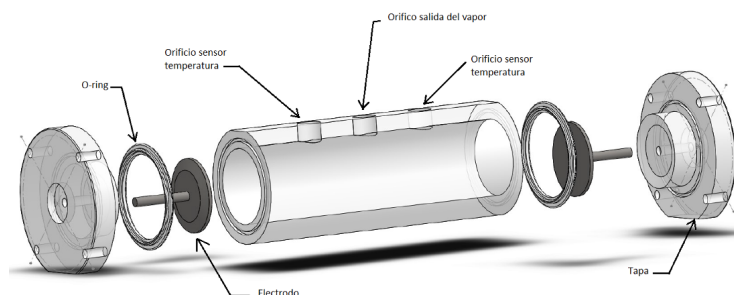
Esta tecnología fue inicialmente explorada en la década de 1960, pero su desarrollo se estancó hasta que fue retomada en los años ochenta por el Centro de Investigación y Desarrollo en Electricidad del Reino Unido. Desde entonces, industrias como APV Baker Ltd. han contribuido a su aplicación a escala industrial (Valderrama Gutiérrez, 2018). El diseño del sistema OH puede adaptarse a diferentes tipos de materiales: el calentamiento óhmico continuo se utiliza para fluidos, mientras que el calentamiento óhmico estático es más adecuado para muestras sólidas o mixtas, dependiendo de las características del producto y del proceso (Valderrama Gutiérrez, 2018).

Entre sus aplicaciones más destacadas en la industria alimentaria se encuentra la extracción de aceites esenciales, donde ha demostrado ser una técnica eficaz y energéticamente eficiente en comparación con métodos convencionales como la hidrodestilación o la destilación por arrastre de vapor (Gavahian et al., 2020). Esta eficiencia se debe a que el calentamiento óhmico mejora la tasa de transferencia de masa y la difusión de compuestos, facilitando una extracción más completa gracias al efecto de electroporación inducido por la corriente eléctrica.

En investigaciones recientes, se ha demostrado que el uso del calentamiento óhmico como pretratamiento en la extracción de aceite de semilla de tomate puede aumentar significativamente el rendimiento del producto. Karunanithi et al. (citado en Sangeetha et al., 2023) reportaron un incremento de hasta el 10,84 % en el rendimiento del aceite, atribuido a la mejora en la difusión y transferencia de masa generada por el tratamiento óhmico.

Figura 2.9.

Esquema de un calentador óhmico para extracción de aceites.



Nota: Valderrama Gutiérrez (2018).

2.1.10. Extracción con agua subcrítica

La extracción con agua subcrítica (SCWE) es una técnica de extracción verde que utiliza agua como disolvente en condiciones de temperatura y presión elevadas, pero por debajo de su punto crítico (374 °C y 22,1 MPa), permitiendo que el agua permanezca en estado líquido. En estas condiciones, el agua disminuye su polaridad, lo que le permite actuar como un disolvente versátil capaz de extraer tanto compuestos polares como no polares (Cheng et al., 2021; Lorenzo et al., 2020).

La SCWE se lleva a cabo generalmente en un intervalo de temperatura entre 100 y 250 °C, mientras que la presión debe mantenerse por encima de 5 MPa para conservar el estado líquido del agua. La operación puede realizarse en modo estático o dinámico, y en algunos casos se utilizan co-disolventes como etanol o líquidos iónicos para mejorar la solubilidad de ciertos compuestos. A medida que aumenta la temperatura, propiedades como la constante dieléctrica, la viscosidad y la densidad del agua se modifican, permitiendo ajustar la solubilidad y selectividad del proceso (Cheng et al., 2021; Moradi-kheibari et al., 2019).

Una de las principales ventajas de la SCWE es su carácter ecológico, al utilizar agua como disolvente en lugar de productos químicos tóxicos, lo que reduce los riesgos ambientales y la necesidad de etapas de purificación posteriores (Kartik et al., 2021). Además, este método permite tiempos de extracción más cortos y mayores rendimientos, con menor consumo de disolvente. Otra ventaja destacada es su capacidad para procesar biomasa húmeda, eliminando etapas como el secado previo, lo que representa un ahorro energético importante en el tratamiento de algas y otras materias primas (Mata et al., 2012). A pesar de sus beneficios, la SCWE presenta desafíos importantes. El primero es su alto consumo energético, debido a las temperaturas y presiones necesarias para mantener el agua en estado subcrítico, lo que encarece la operación (Moradi-kheibari et al., 2019). Además, el diseño de los sistemas de extracción requiere materiales resistentes a la corrosión y la presión, lo que incrementa el costo inicial y complica su escalado industrial (Lorenzo et al., 2020). Por otro lado, algunos compuestos sensibles pueden degradarse a temperaturas elevadas, por lo que es necesario optimizar cuidadosamente las condiciones para evitar pérdidas o alteraciones químicas (Cheng et al., 2021).





La SCWE se ha utilizado ampliamente para la extracción de compuestos bioactivos como polifenoles, flavonoides, alcaloides, aceites esenciales, pectinas y lípidos, a partir de diversas matrices vegetales y microalgas (Herrera-Rodríguez et al., 2022; Kartik et al., 2021). En la industria alimentaria, se emplea para recuperar antioxidantes y aromas naturales. En el campo de los biocombustibles, se utiliza para la obtención de lípidos de microalgas, mientras que en la industria farmacéutica y cosmética permite extraer principios activos de manera limpia y eficiente. También se ha combinado con tecnologías como microondas o ultrasonido para mejorar su rendimiento (Cheng et al., 2021). Un ejemplo representativo es la extracción de aceite esencial de semillas de cilantro (*Coriandrum sativum*), donde se logró una alta concentración de compuestos oxigenados a 125 °C, con un tamaño de partícula de 0,5 mm y un caudal de 2 ml/min, obteniendo un extracto de mejor calidad en comparación con la hidrodestilación o la extracción Soxhlet (Eikani et al., 2007). Otro caso exitoso fue la recuperación de pectinas de residuos de cítricos con un rendimiento superior al 80% mediante SCWE a temperaturas moderadas, lo que demuestra su aplicabilidad industrial (Herrera-Rodríguez et al., 2022). Asimismo, se ha reportado la extracción de lípidos directamente desde biomasa húmeda de microalgas para la producción de biodiesel, evitando la etapa de secado y mejorando la eficiencia global del proceso (Mata et al., 2012).

2.1.11. Extracción con solventes eutécticos profundos

Los solventes eutécticos profundos (DES, por sus siglas en inglés) constituyen una clase emergente de disolventes alternativos ecológicos que comparten muchas propiedades con los líquidos iónicos (LI), pero con claras ventajas en términos de sostenibilidad, toxicidad, costo y facilidad de preparación (Urvika et al., 2025). Los DES son generalmente mezclas de dos o más componentes que, al interactuar fuertemente a través de enlaces de hidrógeno, forman una mezcla eutéctica con un punto de fusión significativamente más bajo que el de cualquiera de sus componentes individuales (Dai et al., 2013). Esta depresión en el punto de fusión se debe a la desorganización de las estructuras cristalinas originales y a las nuevas interacciones intermoleculares, como enlaces de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals y deslocalización de carga (Manurung et al., 2025).

La síntesis de DES es sencilla y rentable. Se realiza normalmente mediante calentamiento suave de los componentes a una temperatura moderada (por ejemplo, 70 °C) con agitación hasta obtener una mezcla líquida

homogénea y estable (Manurung et al., 2025). Los componentes se dividen generalmente en aceptores de enlaces de hidrógeno (HBA), como el cloruro de colina, y donantes de enlaces de hidrógeno (HBD), como urea, glicerol, ácidos orgánicos o alcoholes (Zhou et al., 2024). Dependiendo de su composición química, los DES pueden clasificarse en cinco tipos:

- Tipo I: Sales metálicas + sales de amonio cuaternario.
- Tipo II: Hidratos de sales metálicas + sales de amonio cuaternario.
- Tipo III: Sales de amonio cuaternario + HBD orgánicos (como ácidos carboxílicos o polioles).
- Tipo IV: Cloruros metálicos + HBD.
- Tipo V: Compuestos no iónicos como HBA y HBD (Urvika et al., 2025).

Entre ellos, los DES tipo III y los NaDES (Natural Deep Eutectic Solvents), elaborados a partir de compuestos naturales como azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos, son los más estudiados por su biocompatibilidad y aplicación en alimentos y farmacéuticos (Li, 2022). Los DES presentan varias propiedades que los hacen especialmente atractivos como solventes verdes, poseen baja toxicidad y buena biodegradabilidad, no son inflamables y tienen una presión de vapor insignificante, lo que los hace más seguros que los solventes orgánicos tradicionales (Oguche et al., 2023). Además, tienen una alta viscosidad ajustable mediante adición de agua u otros modificadores y una gran versatilidad de solvencia, capaces de disolver compuestos polares y apolares (Dai et al., 2013).

Figura 2.10.

Esquema de extracción con solventes eutécticos profundos.



Nota: Suthar et al. (2023).

Estos solventes se utilizan en múltiples sectores industriales y científicos. Algunas de sus principales aplicaciones incluyen la extracción verde





de compuestos bioactivos demostrando su eficacia para extraer flavonoides, alcaloides, saponinas, polisacáridos, aceites volátiles y ácidos fenólicos desde fuentes vegetales, superando en eficiencia a los métodos tradicionales (Dai et al., 2013; Li, 2022). Así mismo, tecnologías asistidas por campo físico donde se combinan los DES con microondas, ultrasonido o infrarrojo permitiendo mejorar el rendimiento extractivo, reducir tiempos de procesamiento y ahorrar energía (Zhou et al., 2024). Otra aplicación corresponde al procesamiento de biomasa y valorización de residuos agroindustriales, como la delignificación de materiales lignocelulósicos y la disolución de celulosa (Oguche et al., 2023). De igual forma, es posible emplear los DES en Biotecnología y transformación enzimática, debido a su compatibilidad con enzimas y sustratos sin provocar desnaturalización, lo que los convierte en sustitutos prometedores de solventes como metanol o hexano en bioprocesos (Oguche et al., 2023). Además, estudios recientes han demostrado la viabilidad del uso de DES para la extracción de carotenoides (como el betacaroteno) en matrices lipídicas usando aceites como co-solventes (Manurung et al., 2025), así como para la extracción de aceites esenciales, como el de semilla de comino, mediante tecnologías de microondas (Li, 2022). Estos solventes son una alternativa práctica a los disolventes orgánicos convencionales, al eliminar problemas asociados con toxicidad, inflamabilidad y residuos peligrosos. Su diseño a partir de componentes renovables y no tóxicos, sumado a su ajustabilidad y reutilización, refuerzan su rol clave en procesos sostenibles y seguros para el medio ambiente (Dai et al., 2013; Zhou et al., 2024).

2.2. Caracterización del aceite

2.2.1. Determinación del índice de yodo

Este es un método utilizado para medir el grado de insaturación de grasas y aceites comestibles, se calcula mediante la cantidad de yodo en gramos que puede ser absorbida por 100 gramos de grasa o aceite, lo que proporciona información sobre la cantidad de dobles enlaces presentes en la molécula (Ichu & Nwakanma, 2019). Esta reacción se lleva a cabo en condiciones controladas y se mide la cantidad de yodo que se ha absorbido (Geng et al., 2023). Este parámetro es importante en la industria alimentaria para evaluar la calidad y composición de los aceites y grasas.

Cuanto mayor sea el índice de yodo, mayor será la insaturación del aceite o grasa, lo que puede influir en su estabilidad y propiedades nutri-

cionales. Un alto índice de yodo confiere propiedades beneficiosas para la salud cardiovascular, ya que estos ácidos grasos insaturados, como los omegas 3 y omegas 6, han demostrado reducir el riesgo de este tipo de enfermedades cuando se consumen en cantidades adecuadas. Sin embargo, un índice alto hace que el aceite sea más propenso a la oxidación y a la formación de compuestos no deseados como aldehídos y peróxidos (Maliki et al., 2020).

2.2.2. Determinación del índice de acidez

El índice de acidez de un aceite se determina midiendo la cantidad de hidróxido de potasio necesario para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en un gramo de muestra (Geng et al., 2023; Ichu & Nwakanma, 2019). Este parámetro proporciona información valiosa sobre la calidad de la grasa, ya que un valor ácido más alto indica una mayor concentración de ácidos grasos libres (Ferreira et al., 2021). La presencia de estos puede afectar el sabor, aroma y estabilidad del aceite, por lo que es importante identificar este parámetro. El mal sabor y olor puede deberse a la rancidez hidrolítica (Ferreira et al., 2021).

El monitoreo del índice de acidez permite mantener la calidad de los productos y garantizar que cumplan con los estándares regulatorios de seguridad. Este parámetro es útil en el control de calidad durante el almacenamiento y transporte de estos productos, permitiendo una identificación temprana de posibles problemas de oxidación y rancidez (Grossi et al., 2024).

2.2.3. Determinación del índice de refracción

El índice de refracción (IR) de los aceites vegetales influye en factores como su composición química, el grado de saturación y la temperatura (Ichu & Nwakanma, 2019). La medición de este índice consiste en hacer pasar un haz de luz a través de una muestra de aceite y observar cómo se curva o refracta (Godswill et al., 2018). Esta propiedad sirve como huella dactilar de cada tipo de aceite y puede utilizarse para identificar y diferenciar distintas variedades. Además, los cambios en el índice de refracción de los aceites vegetales a lo largo del tiempo pueden indicar alteraciones en su calidad, como la degradación debido a la oxidación o la contaminación (Mukhametov et al., 2023). De acuerdo con lo anterior, este parámetro permite determinar la calidad del producto, pues se tiene un valor de re-





ferencia para cada tipo de aceite (Mukhametov et al., 2023), por lo que se puede identificar su autenticidad y pureza, diferenciándolos de aceites que hayan sido mezclados con otros. Esta técnica analítica es especialmente valiosa para garantizar la integridad y seguridad de los productos alimentarios, así como para apoyar el cumplimiento de la normativa en la industria alimentaria.

2.2.4. Determinación del índice de saponificación

El índice de saponificación se define como el número de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para saponificar un gramo de aceite (Ichu & Nwakanma, 2019). Este proceso comprende la hidrólisis de los triglicéridos presentes en el aceite en glicerol y sales de ácidos grasos, lo que permite conocer el peso molecular medio de los ácidos grasos (Aslam et al., 2022). Normalmente, un valor de saponificación alto indica la presencia de ácidos grasos de cadena corta, mientras que un valor bajo sugiere ácidos grasos de cadena más larga (Baig et al., 2022). La determinación de este índice se lleva a cabo calentando una cantidad conocida de aceite con una cantidad excesiva de KOH y valorando después el álcali restante con una solución ácida estándar.

En primer lugar, el índice de saponificación es una medida esencial de control de calidad en las industrias alimentaria y cosmética, ya que garantiza que los aceites cumplen normas y especificaciones concretas (Akpambang, 2020). Además, este parámetro puede ayudar a identificar y verificar la pureza de los aceites vegetales, ya que cada tipo de aceite tiene un rango de valor de saponificación característico (Ichu & Nwakanma, 2019). Más allá del control de calidad, el valor de saponificación también tiene importantes implicaciones para las propiedades nutricionales y funcionales de los aceites vegetales. Los aceites con diferentes composiciones de ácidos grasos pueden presentar distintos niveles de estabilidad, puntos de fusión e idoneidad para diferentes aplicaciones culinarias.

2.2.5. Análisis de color

El análisis del color de un aceite refleja la presencia de pigmentos naturales, como clorofila y carotenoides, así como de compuestos indeseables que pueden formarse durante el procesamiento o almacenamiento, como productos de oxidación (Zhang et al., 2021). Por lo tanto, un aceite con un color adecuado y consistente suele ser indicativo de un producto de

alta calidad y bien refinado, mientras que desviaciones en el color pueden señalar problemas de calidad o adulteración.

Para determinar el color del aceite, se pueden emplear métodos visuales o instrumentales. Los métodos visuales implican la comparación del aceite con estándares de color establecidos, utilizando una escala de colores específica, como la escala Lovibond (Mudiyanselage & Wickramasinghe, 2023). Este método es sencillo y rápido, pero puede estar sujeto a variaciones debido a la percepción subjetiva del observador. Por otro lado, los métodos instrumentales, como la espectrofotometría, proporcionan una medición más precisa y objetiva del color del aceite (Luzi et al., 2021; Peamaroon et al., 2021). Estos instrumentos miden la absorbancia de luz en diferentes longitudes de onda, permitiendo una evaluación detallada y cuantitativa del color.

El análisis instrumental del color es especialmente útil en un entorno de control de calidad, donde se requiere una alta precisión y repetibilidad. Además, la información obtenida del análisis de color puede ser utilizada para ajustar y optimizar los procesos de refinación, asegurando que el aceite cumpla con las especificaciones deseadas.

2.3. Conclusiones

En este capítulo, se revisaron algunas de las técnicas experimentales más importantes para la extracción de aceite, dentro de ellas se destacan la extracción con solventes, el prensado en frío y la centrifugación, la extracción asistida por ultrasonido, la extracción supercrítica y la tecnología de membranas. Algunas de ellas presentan mejoras en el rendimiento, calidad del producto y sostenibilidad ambiental. De igual forma se presentaron algunas técnicas de caracterización de los aceites que ayudan a identificar su calidad mediante su color, antioxidantes, contenido de ácidos grasos, sabor y olor. Cada una de las técnicas mencionadas permiten obtener aceites para las distintas industrias (cosmética, alimenticia, farmacéutica o de bioplásticos), debido a que cada una de ellas requiere productos con unas características específicas.





CAPÍTULO 3

ESCALAMIENTO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE MEDIANTE SIMULACIÓN DE PROCESOS

| 59



La simulación de procesos es una técnica que avanza a gran velocidad, en esta se utilizan modelos matemáticos apropiados y termodinámicos para representar y analizar las operaciones de un proceso industrial. El escalamiento de procesos es un paso crítico en la transición de la investigación y desarrollo a la producción comercial a gran escala, esta se realiza mediante software especializados que ayudan a predecir el comportamiento de los procesos y de esta manera ajustar las variables críticas, identificar cuellos de botella, optimizar la operación y reducir los costos de experimentación. La simulación es una herramienta que permite extraer información acerca de la naturaleza de un sistema, por medio de la aplicación de modelos que ayudan a comparar los resultados obtenidos con sistemas reales (Chen et al., 2024; López et al., 2019).

La aplicación de la ingeniería de procesos asistida por computador ha transformado y optimizado los procesos químicos, por lo que la simulación se ha convertido en una parte fundamental en el diseño de procesos. El modelado se puede clasificar en tres tipos según la cantidad de datos utilizados para establecer el modelo del proceso: modelo de mecanismos, modelo basado en datos y modelo mixto. El modelo de mecanismos o de primeros principios, se deriva de las leyes de la termodinámica, la cinética, de conservación y las propiedades de los fluidos, principalmente. Este modelo es capaz de predecir eficientemente las características de los procesos, lo que ofrece una buena capacidad de extrapolación e interpretación de los datos. Algunos de los softwa-



res o programas de para la simulación de procesos más usados a nivel mundial y que permiten diseñar sistemas reales son Aspen Plus[®], Aspen HYSYS[®], PRO/II[®] y ChemCAD[®]. Sin embargo, debido a la naturaleza compleja de los procesos químicos, puede ser difícil establecer un modelo de mecanismo completo. Por lo que, en muchos casos, es necesario realizar diversas suposiciones que ayuden a comprender los mecanismos químicos involucrados (Zhu & Wang, 2024). Los entornos de simulación de Flujogramas Modulares Secuenciales (SMFS), como Aspen Plus[®], son muy utilizados por su facilidad de uso y solidez al abordar problemas de simulación de procesos a gran escala. Estos entornos permiten gestionar un gran número de operaciones unitarias, corrientes de proceso y sustancias químicas. (Nosrati-Ghods et al., 2020). El escalamiento de procesos parte de datos experimentales obtenidos de la caracterización de la materia prima, de esta manera se garantiza que el proceso simulado cuenta con características y composiciones reales que permitan obtener una aproximación acertada del producto y sus propiedades tales como peso molecular, punto de ebullición, entre otros (Liu et al., 2021).

Muchas plantas químicas que operan actualmente se diseñaron con sistemas que no optimizan los flujos de energía y procesos, lo que se traduce en problemas de contaminación, económicos y sociales. Por esta razón, es necesario identificar y evaluar medidas para mejorar las plantas existentes o diseñar nuevos procesos con metodologías innovadoras y sostenibles (Dyudnev et al., 2021). La simulación de procesos es una herramienta que brinda innumerables beneficios para la industria química, ya que facilita el cumplimiento de objetivos, ahorrando tiempo y dinero (Castillo et al., 2013). Además, permite analizar diferentes configuraciones de diseño y condiciones de operación para evaluar la viabilidad técnica de un proceso (Polo, 2017). En el presente capítulo se planteó el diseño y simulación del proceso de extracción de aceite de aguacate a partir de la pulpa usando como software de simulación Aspen plus[®], teniendo en cuenta valores experimentales obtenidos en la caracterización de la pulpa de aguacate y otros de trabajos reportados en la literatura. La capacidad de producción de la planta se estableció considerando la producción de aguacate en la región de los Montes de María. Además, se seleccionó un modelo termodinámico que se ajusta a las características del proceso y a los equipos necesarios para lograr el máximo rendimiento del producto.

3.1. Determinación del perfil de ácidos grasos de pulpa de aguacate

El aguacate criollo-antillano producido en la región de los Montes de María tiene una composición específica de lípidos por lo que fue necesario deter-



minar los compuestos presentes en la pulpa, la cual fue usada para la obtención de aceite de aguacate. La caracterización se realizó en el laboratorio de la Universidad de Industrial de Santander donde se cuantificó la concentración de ácidos grasos. En la Tabla 3.1 se observa el perfil lipídico de la muestra de aguacate seleccionada, obtenido mediante la identificación de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), la cual permitió establecer la presencia y cuantificar la cantidad de ácidos grasos saturados, insaturados, poliinsaturados y *trans* presentes en la pulpa. Entre los ácidos grasos saturados presentes se encuentran el ácido cáprico, láurico, mirístico, pentadecanoico, palmítico, heptadecanoico, esteárico, araquídico, behénico y lignocérico, correspondientes a las cadenas C10:0, C12:0, C14:0, C15:0, C16:0, C17:0, C18:0, C20:0, C22:0 y C24:0, respectivamente. Los ácidos grasos insaturados se dividen en monoinsaturados y poliinsaturados. La pulpa de aguacate contiene ácidos monoinsaturados como el ácido oleico, palmitoleico, eláidico y eicosenoico, identificados como C18:1n9c, C16:1, C18:1n9t y C20:1n9, respectivamente; y ácidos poliinsaturados como el ácido linoleico, g-linolénico y linolénico, correspondientes a C18:2n6c, C18:3n6 y C18:3n3, respectivamente (Fundación Iberoamericana de Nutrición, 2012).

Tabla 3.1.

Concentración de ésteres metílicos de ácidos grasos presentes en la pulpa de aguacate (mg/100 g de muestra).

Ácidos grasos	Primera medición	Segunda medición	Promedio
Cáprico (C10:0)	<1	<1	<1
Láurico (C12:0)	1	1	1
Mirístico (C14:0)	9	9	9
Pentadecanoico (C15:0)	1	1	1
Palmítico (C16:0)	1.311	1.320	1.316
Palmitoleico (C16:1)	435	440	438
Heptadecanoico (C17:0)	2	2	2
Esteárico (C18:0)	55	54	55
Eláidico (C18:1n9t)	19	17	18
Oleico (C18:1n9c)	1.654	1.641	1.648
Linoleico (C18:2n6c)	916	924	920
g-Linolénico (C18:3n6)	13	12	13
Linolénico (C18:3n3)	123	124	124
Araquídico (C20:0)	7	7	7
Eicosenoico (C20:1n9)	5	5	5
Behénico (C22:0)	5	5	5
Lignocérico (C24:0)	10	9	10



Los ácidos grasos insaturados se clasifican según su estructura en *cis* o *trans*. Los ácidos grasos *trans* generalmente tienen lugar a partir de la hidrogenación de aceites vegetales insaturados (Cabezas et al., 2016). Según la Tabla 3.2, la pulpa de aguacate contiene dos ácidos grasos *cis*, correspondientes al linoleico y el oleico, y un ácido graso *trans*, el elaídico. Además, la pulpa de esta fruta contiene ácidos grasos esenciales que se clasifican según la cantidad de omegas que poseen: el ácido linolénico pertenece a los omegas 3, los ácidos linoleico y g-linolénico a los omegas 6, y el ácido elaídico, eicosenoico y oleico a los omegas 9.

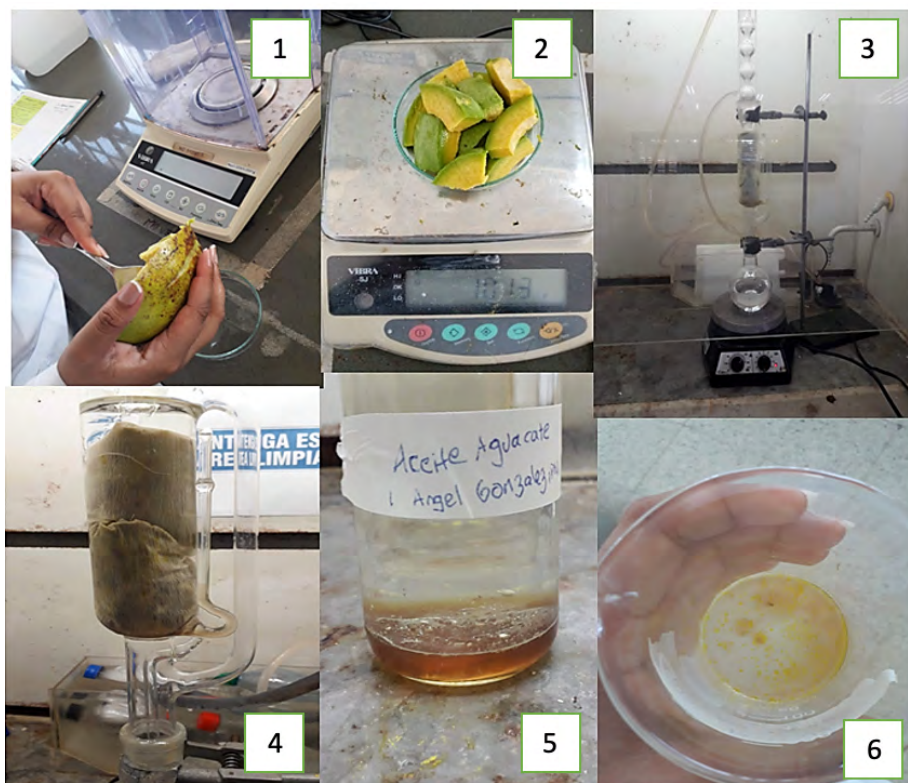
Tabla 3.2.
Concentración de ésteres metílicos de ácidos grasos saturados, insaturados y *trans* presentes en la pulpa de aguacate (mg/100 g de muestra).

Ácidos grasos	Concentración del ácido graso (mg/100 g de muestra)
Saturados	1.405
Monoinsaturados	2.090
Poliinsaturados	1.056
Trans	18
TOTAL	4.569

La pulpa de aguacate caracterizada contiene en total 10 ácidos grasos saturados, 4 ácidos grasos monoinsaturados y 3 ácidos grasos poliinsaturados, incluyendo uno con omega 3, dos con omega 6 y tres con omega 9. Estos ácidos grasos también se encuentran en alimentos como el maíz, girasol, oliva, pescado, aceite de coco, aceite de palma, mantequilla, semillas, cacahuetes y grasas animales (Ros et al., 2015). La composición de la pulpa de aguacate, con altos niveles de ácidos grasos insaturados, minerales, proteínas y fibra, no solo favorece la nutrición, sino que también la convierte en una excelente opción para una dieta equilibrada y saludable, contribuyendo a la reducción del colesterol y la prevención de enfermedades cardiovasculares (Figuerola et al., 2021; Jiménez et al., 2020).

Figura 3.1.

Obtención de aceite de aguacate a escala laboratorio 1) Despulpado del aguacate 2) Pesado del aguacate 3) Montaje soxhlet 4) Proceso de extracción 5) Aceite de aguacate y solvente 6) Aceite de aguacate



De acuerdo con los estudios reportados en la literatura se observó que la extracción con solvente usando el método soxhlet es una de las técnicas más eficientes para la obtención de aceite, dejando alrededor de 1 % de residuos de solvente. Para este proceso de extracción se seleccionó hexano debido a su alta solubilidad, fácil recuperación y su capacidad de separar el aceite presente en la biomasa (Esonye et al., 2021). A nivel de laboratorio se hizo la extracción de aceite iniciando con el lavado de la fruta para eliminar las impurezas, luego se separó la pulpa de la cáscara y la semilla, la pulpa obtenida se trituro hasta homogenizar completamente con el fin de facilitar el secado en la etapa posterior. Para reducir el contenido de humedad presente en la pulpa se envió a un secador de bandejas antes de pasar a la extracción del aceite (Xuan, 2019). La pulpa deshidratada se dispuso en un papel filtro y se depositó en el equipo soxhlet manteniendo una tem-





peratura de 70°C durante un periodo de 4 horas (Ariza et al., 2011). En la Figura 3.1 se representa parte del proceso llevado a cabo en el laboratorio de la Universidad de Cartagena.

3.2. Modelado del proceso de extracción de aceite de aguacate

La cadena de producción de aceite de aguacate se modeló mediante el software Aspen Plus®, con el fin de estudiar el desempeño de la ruta de aprovechamiento de la pulpa de aguacate a escala industrial; para ello se tomó información de la literatura y caracterización de la materia prima que permitió alimentar los datos requeridos por el simulador. Se estableció como estado de referencia una temperatura de 30°C y 1 atmósfera de presión, ya que estas corresponden a las condiciones ambientales de la región de los Montes de María (Méndez et al., 2015). Con el fin de establecer la capacidad de la planta de extracción de aceite, se consideró la producción total de aguacate en la región de los Montes de María, que asciende a 35.000 t/año (Mallarino et al., 2020). Se estimó que el 30% de esta producción se ve afectada por problemas de comercialización, presencia de hongos y otros factores que disminuyen su atractivo para el consumo, por lo que la fruta se descarta. Por lo tanto, se estableció que la capacidad de producción de la planta de extracción de aceite de aguacate sería equivalente a 10.605 t/año de la producción total de la región.

En la base de datos del software se seleccionaron los compuestos químicos involucrados en el proceso. Además, se seleccionó la ecuación de estado y el modelo termodinámico apropiados para estimar las propiedades de las sustancias (Meramo et al., 2019a). De igual manera, se suministraron condiciones de entrada como presiones, temperaturas, flujos de masa, entre otros. Para el desarrollo de la simulación se hicieron las siguientes consideraciones:

- Se seleccionó el modelo termodinámico UNIQUAC-RK, el cual utiliza el modelo de coeficiente de actividad UNIQUAC para la fase líquida, que puede ajustarse a combinaciones de compuestos polares y no polares, hasta una no idealidad muy fuerte. Para la fase de vapor la ecuación de estado de Redlich-Kwong (RK), esta es empleada para modelar sistemas monofásicos o multifásicos y medir características termodinámicas como entalpía, densidad, balances de fase, entre otros (Rezakazemi et al., 2018).



- Adicionalmente, las unidades de mezcla se simularon como tanques con agitador y se utilizó un molino de bolas para la etapa de homogeneización donde se busca formar una pasta con la pulpa de aguacate.
- Se utilizó un filtro para la separación de la pulpa contenida en el agua, donde el 5% de los sólidos salen por la corriente 16, corriente residual de la misma etapa.
- Para la fase de obtención de aceite aguacate se consideró que este queda con menos de 1 % de hexano (Esoney et al., 2021).
- Se recupera el 3% del hexano.
- Para determinar la distribución del fruto del aguacate, se consideró la composición del epicarpio, mesocarpio y endocarpio según lo reportado por Robayo (2016). De acuerdo con la Tabla 1.2, al normalizar los valores se obtiene que la cáscara constituye el 10,51%, la pulpa el 70,87% y la semilla el 18,62%. La composición aproximada de la pulpa y la semilla del aguacate (%p/p) se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3.

Composición aproximada de la pulpa y semilla del aguacate (%p/p)

Constituyente (%)	Pulpa	Semilla
Humedad	78,24 ± 2,54	56,04 ± 2,58
Lípidos	15,39 ± 1,56	1,87 ± 0,31
Carbohidratos	4,17 ± 1,37	33,17 ± 2,73
Proteína	1,01 ± 0,18	1,95 ± 0,16
Ceniza	0,66 ± 0,09	1,87 ± 0,24
Fibra	0,53 ± 0,16	5,10 ± 1,11

Nota: Adaptado a partir de Bora et al. (2001).

Los modelos seleccionados pueden presentar ciertas limitaciones debido a la naturaleza de los compuestos, los aceites vegetales están formados por una mezcla de ácidos grasos, triglicéridos, ésteres y otros compuestos naturales que en algunos casos no se encuentran en el simulador (Aspen Technology, 2020). De igual forma, muchos de estos compuestos no cuentan con parámetros de interacción binaria y el modelo asume interacciones binarias promedio, lo que puede ocasionar que no se capten adecuadamente las interacciones específicas de los componentes (Reid et al., 1987; Smith et al., 2005). A pesar de esto, el modelo seleccionado permitió simular el proceso de obtención de aguacate de una manera acerta-



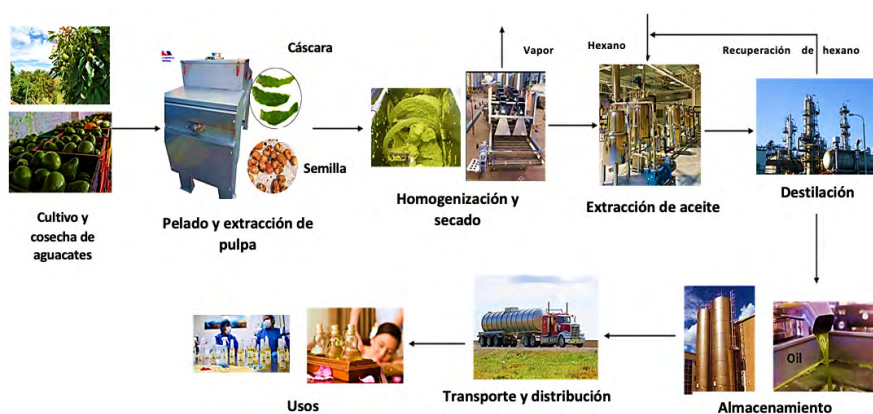
da, debido que se realizaron consideraciones que permitieron representar las propiedades del producto principal, logrando una aproximación por encima del 90% como se observa en la sección de validación de resultados.

3.2.1. Descripción del proceso de extracción de aceite de aguacate

En la Figura 3.2 se observa la cadena de producción de aceite a partir de la pulpa de aguacate, desde la cosecha del fruto hasta el uso final del producto. La Figura 3.3 muestra el diagrama de procesos, en el cual se alimentan 10.605 t/año de aguacate de la variedad criollo-antillano (corriente 1), este se lava (W-AVOC) con una solución de hipoclorito de sodio para eliminar la suciedad y los patógenos (Sandoval et al., 2010); para cada 97 kg de aguacate se utilizan 200 litros de agua (Acosta, 2011). Posteriormente, se retira la cáscara del aguacate (SEP-PEEL) y en la siguiente etapa (PULP-EXT) se separa la pulpa (corriente 7) de la semilla (corriente 8).

Figura 3.2.

Cadena de producción del aceite de aguacate.



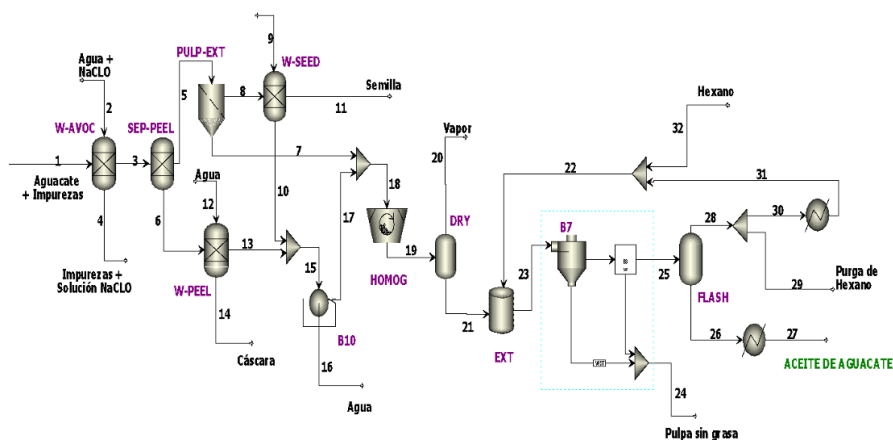
La cáscara y la semilla se lavan para recuperar la pulpa que queda luego del pelado y el despulpado, obteniendo las corrientes 10 y 13 como pulpa y agua recuperadas, respectivamente; estas se envían a una etapa de centrifugación (B10) para eliminar el agua. Se utilizan aproximadamente 26.000 t/año de agua para el lavado. La corriente resultante (corriente 17) se combina con la pulpa extraída inicialmente (corriente 7) y se envía a una etapa de homogeneización (HOMOG). Luego, la pasta formada (corriente 19) se seca a 70 °C para eliminar el exceso de agua y reducir la humedad presente en ella (Ariza et al., 2011), este proceso es importante debido a que la extracción en húmedo proporciona bajos rendimientos (Martínez et al., 1988).



La pulpa deshidratada se mezcla con hexano en la etapa de extracción (EXTR), llevando a una temperatura de 70 °C (Ariza et al., 2011). Este proceso produce una mezcla de aceite, pulpa y solvente (corriente 23), la cual se centrifuga (B7) para separar la pulpa residual de la mezcla de aceite y solvente (corriente 25). Posteriormente, esta mezcla se envía a una destilación *flash* (FLASH) para separar el aceite del hexano.

Figura 3.3.

Diagrama del proceso de extracción de aceite de aguacate en el software Aspen Plus.



El producto obtenido se enfría a 18 °C para prevenir la oxidación que ocurre a altas temperaturas (Robayo, 2016). Finalmente, se obtienen 1.000,66 toneladas al año de aceite de aguacate en la corriente 27. Gracias al diseño del proceso, aproximadamente el 97 % del hexano recuperado (corriente 28) se recircula a la etapa de extracción. La Tabla 3.4 muestra el calor generado por los equipos según la simulación.

Tabla 3.4.

Requerimiento energético (MJ/h) de los equipos de obtención de aceite de aguacate.

Equipos	Heat duty (MJ/h)
Secado	1.689,50
Destilación hexano	144,80
Condensación hexano	-123,50
Refrigeración de aceite	-11,18



Del procesamiento de 10.605 toneladas por año de aguacate, se obtiene una producción de 1.000,66 t/año de aceite de aguacate. A continuación, en la Tabla 3.5 muestra las principales corrientes del proceso con sus condiciones de operación.

Tabla 3.5.

Composición y condiciones de operación de las corrientes principales del proceso de extracción de aceite de aguacate.

Corriente	1	11	21	23	25	27	32
Temperatura (°C)	30,0	30,00	70,00	52,91	52,91	18,00	30,00
Presión (bar)	1,00	1,00	0,31	1,00	1,00	1,00	1,00
Flujo másico (Kg/h)	1097,50	210,46	165,38	563,31	480,73	103,49	32,00
Hexano	0,000	0,000	0,000	0,706	0,787	0,011	1,000
Hipoclorito de sodio	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Agua	0,669	0,577	0,021	0,006	0,000	0,000	0,000
Leucina	0,016	0,019	0,045	0,013	0,000	0,000	0,000
Glucosa	0,175	0,337	0,215	0,063	0,000	0,000	0,000
Óxido de calcio	0,025	0,049	0,031	0,009	0,000	0,000	0,000
Ácido láurico	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ácido mirístico	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000
Ácido palmítico	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ácido palmitoleico	0,041	0,000	0,264	0,077	0,082	0,380	0,000
Ácido heptadecanoico	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ácido esteárico	0,001	0,000	0,008	0,002	0,003	0,012	0,000
Ácido oleico	0,046	0,018	0,251	0,074	0,078	0,362	0,000
Ácido linoleico	0,022	0,000	0,138	0,041	0,042	0,197	0,000
Ácido linolénico	0,003	0,000	0,021	0,006	0,006	0,029	0,000
Ácido araquídico	0,001	0,000	0,004	0,001	0,001	0,006	0,000

Para la extracción de aceite, se eligió el hexano como solvente debido a su naturaleza no polar y otros factores importantes como su disponibilidad, precio, punto de ebullición, que facilita su recuperación durante la evaporación, y su carácter no higroscópico (Mgoma et al., 2021). El aceite extraído y separado en la etapa de destilación se enfría a temperatura ambiente para prevenir la oxidación que ocurre a altas temperaturas (Robayo, 2016). Además, el aceite de aguacate crudo necesita ser refinado antes de su uso en productos cosméticos (Cervantes & Yahia, 2021).

En las últimas décadas, la búsqueda de alternativas al hexano como



disolvente de extracción de aceites ha cobrado gran relevancia en el marco de los principios de la Química Verde. Aunque el hexano presenta ventajas técnicas bien establecidas, como un bajo punto de ebullición ($\sim 70^\circ\text{C}$), alta selectividad lipofílica y facilidad de separación, su toxicidad y carácter volátil lo convierten en un compuesto orgánico volátil (COV) altamente cuestionado en términos ambientales y de seguridad (Cravotto et al., 2022). Uno de los solventes alternativos más prometedores es el 2-metilo-xolano (2-MeOx), un éter cíclico derivado de biomasa lignocelulósica, que presenta características fisicoquímicas comparables al hexano, como punto de ebullición moderado (80°C), baja viscosidad y buena capacidad de penetración en matrices sólidas, lo que lo hace adecuado para aplicaciones industriales en la extracción de productos lipófilos (Rapinel et al., 2020). Además de su origen renovable, el 2-MeOx es considerado más seguro y ecológico, ya que es biodegradable y menos tóxico. Paralelamente, otros enfoques alternativos incluyen el uso de disolventes eutécticos profundos (DES) y sus variantes naturales (NADES), formados a partir de metabolitos primarios como azúcares, ácidos orgánicos y aminoácidos. Estos presentan baja toxicidad, alta biodegradabilidad y son adecuados para aplicaciones alimentarias y cosméticas (Cravotto et al., 2022). También se ha explorado el uso de líquidos iónicos (ILs) y disolventes bio-basados como el etanol, lactato de etilo y limoneno, aunque los ILs han sido cuestionados por su baja biocompatibilidad. Si bien el agua es el disolvente más ecológico disponible, su eficacia en la extracción de compuestos lipofílicos es limitada, lo que ha motivado el desarrollo de estrategias combinadas o el uso de co-disolventes para mejorar su rendimiento (Cravotto et al., 2022). En conjunto, estos avances evidencian una clara tendencia hacia la sustitución progresiva del hexano en favor de solventes más sostenibles y compatibles con la bioeconomía.

3.2.2. Validación de resultados de la extracción de aceite de aguacate

El proceso de extracción de aceite utilizando hexano como solvente mostró un rendimiento del 65,19 %, comparable al proceso de producción de aceite descrito por Reddy et al. (2012), donde se alcanzó una conversión del 64,76 % de pulpa de aguacate en aceite mediante extracción con solventes. Este proceso se realizó a una temperatura de $69,1^\circ\text{C}$ y a presión atmosférica, logrando una aproximación del 99,34 % con respecto al valor reportado en el estudio antes mencionado.

Además, para validar los resultados de la simulación, se comparó el



valor de la densidad del aceite proporcionado por el software Aspen Plus con los reportados en la literatura. Como se muestra en la Tabla 3.7, la densidad del aceite de aguacate simulado es inferior al valor reportado por Macías y Rodríguez (2021), quienes calentaron la pulpa de aguacate para extraer el aceite; la densidad se evaluó a una temperatura de 25 °C. La aproximación obtenida para esta propiedad respecto a la literatura es del 98,29 %, lo que demuestra que las consideraciones, modelos termodinámicos y estrategias utilizadas en esta simulación son acertadas, ya que se observa una densidad similar a la reportada en otros estudios.

Tabla 3.6.

Validación de propiedades del aceite de aguacate.

Aceite de aguacate			
Parámetro	Reddy et al., (2012)	Este trabajo	Aproximación (%)
Rendimiento (%)	64,76 %	65,19 %	99,34 %
Propiedad	Macías y Rodríguez (2021)	Este trabajo	Aproximación (%)
Densidad (g/cm ³)	0,896	0,881	98,29 %
Propiedad	Ferdinand et al., (2011)	Este trabajo	Aproximación (%)
HHV (kJ/g)	40,27	41,02	98,13 %
Propiedad	Jiménez et al., (2001)	Este trabajo	Aproximación (%)
Índice de yodo (eq I ₂ /g)	83,35	84,24	98,93 %
Índice de saponificación (mg KOH/g)	217	211	97,23 %

Cabe destacar que propiedades como el índice de saponificación, acidez, yodo, entre otros, no se encuentran en la base de datos del software utilizado o no mostraron resultados. En el presente estudio, se determinaron propiedades del aceite de aguacate, como el índice de saponificación (SV) y el índice de yodo (IV), estas propiedades se calcularon aplicando las ecuaciones (3.1) y (3.2) propuestas por Ferdinand (2012). Se obtuvo un índice de yodo de 84,24 eq I₂/g y un índice de saponificación de 211 mg KOH/g, con una aproximación superior al 97 %.

$$IV = \frac{100(253,51 \text{ db})}{MW} \quad (3.1)$$

$$SV = \frac{56,106}{MW} \quad (3.2)$$

En cuanto al poder calorífico superior (HHV) del aceite de aguacate, se calculó utilizando la ecuación (3.3) desarrollada por Demirbas (2000) para aceites vegetales, la cual considera la densidad (g/cm³) de dicho aceite. Según se observa en la Tabla 3.6, el aceite simulado tuvo un HHV de 41,019 kJ/g. No se encontraron registros en la literatura sobre el poder calorífico superior específico para el aceite de aguacate, por lo que se comparó con el aceite de ricino, utilizado en la industria cosmética, obteniendo una aproximación del 98,13 %. Es relevante determinar esta propiedad en los aceites, ya que indica cuánto calor se libera por gramo de compuesto al quemarse (Ferdinand, 2011).

$$HHV = 79,014 - 43,126(d)$$

(3.3)

La Tabla 3.7 compara las densidades de tres ácidos grasos presentes en el aceite de aguacate. Los valores de referencia provienen del estudio realizado por Cedeño et al. (1999), que reporta las densidades de diferentes ácidos grasos a distintas temperaturas. La densidad del ácido palmítico obtenida en la simulación se comparó con los datos de la literatura a 65 °C, la del ácido esteárico a 75 °C, y la del ácido oleico a 25 °C. En cuanto a la viscosidad, se compararon los valores para los ácidos palmítico y esteárico a 70 °C y 75 °C, respectivamente, y para el ácido oleico a 25 °C. Las viscosidades de algunos ácidos se reportaron a temperaturas superiores a 25 °C, ya que a temperaturas más bajas son nulas. Se logró una alta precisión (>97 %) al comparar las propiedades de los ácidos grasos.

Tabla 3.7.
Validación de propiedades de algunos de los ácidos grasos presentes en el aceite de aguacate.

Densidad (g/cm³)			
Ácidos grasos	Este libro	Cedeño et al. (1999)	Aproximación (%)
Palmítico (C16:0)	0,8526	0,8577	99,40 %
Esteárico (C18:0)	0,8448	0,8490	99,50 %
Oleico (C18:1 n9)	0,8837	0,8904	99,24 %
Viscosidad (Pa. S)			
Ácidos grasos	Este libro	Cedeño et al. (1999)	Aproximación (%)
Palmítico (C16:0)	0,00762	0,00759	99,60 %
Esteárico (C18:0)	0,00851	0,00830	97,46 %
Oleico (C18:1 n9)	0,02964	0,02931	98,87 %



3.3. Conclusiones

La simulación de una planta de producción industrial para la producción de aceite de aguacate permite evaluar el proceso desde diferentes puntos de vista, ya que se contemplan distintos escenarios y consideraciones, con el fin de elegir la configuración que genere los mejores resultados económicos, ambientales y energéticos. En el presente capítulo, se simuló una planta de procesamiento de aguacate para obtener aceite, utilizando aguacates de la variedad criollo-antillano producidos en la región de los Montes de María, en el norte de Colombia. La comparación de propiedades como la densidad y la viscosidad de algunos de los ácidos grasos presentes en el aceite de aguacate permite identificar la aproximación del diseño y la simulación del proceso de extracción de aceite, obteniendo un porcentaje de rendimiento de aceite del 65,19%, muy cercano al reportado en la literatura para un proceso que utiliza hexano como solvente. Se recomienda el uso de corrientes de desechos como la semilla y la cáscara que se obtienen de las etapas de pelado y despulpado, para reducir la acumulación de residuos en el medio ambiente, generando productos de valor añadido a partir de biomásas que son ricas en celulosa, hemicelulosa y lignina.



CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DE CANTIDAD Y CALIDAD DE ENERGÍA BASADA EN ANÁLISIS EXERGÉTICO EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE

| 73



Se reconoce el uso del análisis de exergía como una herramienta importante y provechosa para evaluar el rendimiento y la eficiencia de diversos equipos, procesos y otros sistemas térmicos, este análisis suministran información útil sobre la utilización de la energía y la calidad del trabajo generado dentro de un sistema, por lo tanto es práctico para evaluar la eficiencia del proceso, conllevando esto a proporcionar información importante y valiosa al momento de optimizar el diseño y el funcionamiento de equipos y procesos con el objetivo de lograr mayores eficiencias energéticas. Al tener en cuenta tanto la primera como la segunda ley de la termodinámica, el análisis de exergía ofrece una comprensión integral de los procesos termodinámicos, las pérdidas y las áreas potenciales de mejora (Parikhani et al., 2021). Mientras que el análisis energético se enfoca en la cantidad de flujos y conversiones de energía, ofreciendo una evaluación general del rendimiento energético del sistema, el análisis de exergía, en contraste, examina la calidad y utilidad de la energía. Al medir la destrucción de exergía y las irreversibilidades dentro de un sistema, siendo así factible identificar los componentes y procesos principales que contribuyen a las pérdidas de energía. Además de la valoración de la eficiencia, el análisis de energía y exergía habilita la realización de comparaciones en cuanto al rendimiento entre diversos procesos (Elwardany, 2024).



La exergía, representa la cantidad máxima de trabajo útil de alta calidad que podría obtenerse al convertir cualquier forma de energía en un sistema de referencia durante un proceso reversible (Liu et al., 2023). Este concepto es fundamental en la termodinámica y se utiliza para evaluar la eficiencia de los procesos energéticos, permitiendo determinar el potencial real de trabajo disponible en un sistema dado. La exergía, al considerar tanto la cantidad como la calidad de la energía, proporciona una medida más precisa de la utilidad de un recurso energético en comparación con otras métricas más simples como la entalpía o la energía interna. Por lo tanto, su aplicación permite una evaluación más completa y detallada del rendimiento energético de un sistema o proceso.

La implementación de un análisis exergético se fundamenta como un pilar fundamental en la búsqueda de la optimización y preservación de recursos energéticos, con implicaciones directas en la estabilidad económica y el impulso al desarrollo sostenible. Este enfoque detallado no solo resalta las aplicaciones prácticas inherentes, sino también subraya la urgente necesidad de que diversos sectores industriales adopten tanto los análisis de exergía convencionales como aquellos de una naturaleza más avanzada. Se resalta que, si bien estos análisis se emplean mayormente considerando el sistema en su totalidad, también representan una herramienta invaluable para el estudio minucioso de equipos específicos o partes particulares de los procesos. Esta dualidad en su aplicación permite una comprensión holística de los sistemas energéticos, mientras se ofrece la flexibilidad necesaria para investigaciones más detalladas en áreas específicas (Prajapati et al., 2024).

4.1 Cálculo de la exergía de un proceso

Mediante un análisis exergético exhaustivo, es posible detectar tanto la ubicación como la extensión de las ineficiencias termodinámicas presentes en un sistema de conversión energética, así como también determinar sus fuentes. Esta valiosa información puede emplearse con el propósito de incrementar la eficiencia del sistema bajo escrutinio. La exergía, en este contexto, se define como la cantidad máxima de trabajo útil teórico obtenible de un sistema de conversión de energía conforme éste alcanza un equilibrio termodinámico absoluto con su entorno (Karami et al., 2022). La exergía total se compone de cuatro elementos principales: físico, químico, potencial y cinético. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones ingenieriles, se prioriza la consideración de las exergías física y química

(Cavalcanti et al., 2021). La ecuación 4.1 establece la relación entre las exergías netas a través de la transferencia de masa, trabajo y calor, es decir, calcula la pérdida de exergía total. Por otra parte, la ecuación 4.2 describe el flujo de exergía de masa por medio de la adición de la exergía física, química, potencial y cinética, respectivamente; sin embargo, los dos últimos términos se consideran poco significativos ya que son considerablemente más bajos en comparación con las exergías químicas y físicas.

$$Ex_{p\acute{e}rdidas} = Ex_{mass_{net}} + Ex_{heat_{net}} + Ex_{work_{net}} \quad (4.1)$$

$$Ex_{masa} = Ex_{f\acute{is}ica} + Ex_{qu\acute{í}mica} + Ex_{potencial} + Ex_{cin\acute{e}tica} \quad (4.2)$$

Con respecto al cálculo de la exergía química, esta operación se lleva a cabo usando la ecuación 4.3 donde según corresponda en el proceso estudiado, representa es la fracción molar o másica del componente, y_i es la exergía química del componente en la mezcla y R ilustra la constante universal de los gases. La exergía química de cada puede calcularse por medio de la ecuación 4.4, sin embargo, estos datos generalmente se encuentran reportados en la literatura (González-Delgado et al., 2022b), para esta ecuación G^0 es la energía libre de Gibbs estándar de formación del componente, n es el número de átomos del elemento en el componente, $Ex^0_{ch,j}$ es la exergía química estándar del elemento.

$$Ex_{qu\acute{í}mica-me} = \sum_i y_i Ex^0_{ch,i} + RT_0 \sum_i y_i \ln(y_i) \quad (4.3)$$

$$Ex^0_{ch,i} = \Delta G^0_f + \sum_j n_j Ex^0_{ch,j} \quad (4.4)$$

La exergía física denota el trabajo máximo útil logrado al transferir una unidad de masa de una sustancia desde un estado particular al estado de referencia, exclusivamente mediante procesos físicos. Este valor puede ser determinado a partir de los niveles de entalpía (H), que representa la energía relacionada con un flujo bajo presión constante y puede ser intercambiada con los alrededores, y la entropía (S), que se define como la energía no utilizable o pérdida para llevar a cabo un trabajo, teniendo en cuenta la composición de la corriente, tanto en el estado específico como en las condiciones de temperatura y presión del estado de referencia (González-Delgado & Aguilar-Vásquez, 2022). La ecuación (4.5) relaciona





la entalpía () y entropía de la mezcla () con sus respectivos valores en condiciones de referencia incluyendo de temperatura del ambiente referencia . Para el caso en que la corriente se comporte como gas ideal y su capacidad calorífica se constante, se emplea la ecuación 4.6; si por el contrario la corriente de proceso se encuentra en estado líquido o sólido se aplica la ecuación 4.7, teniendo en cuenta una capacidad calorífica (C_p) constante.

$$Ex_{física} = (\dot{H} - \dot{H}_0) + T_0(\dot{S} - \dot{S}_0) \quad (4.5)$$

$$Ex_{física} = C_p(T - T_0) - T_0 \left(C_p \ln \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (4.6)$$

$$Ex_{física} = C_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \ln \frac{T}{T_0} \right] - V_m(P - P_0) \quad (4.7)$$

La exergía se caracteriza como el potencial máximo de trabajo, debido a esto, un intercambio de trabajo en términos de energía resulta equiparable en términos de exergía; por ende, el contenido exergético de una corriente de trabajo representa la cantidad de trabajo de dicha corriente 8 bajo el supuesto de que no se produce un cambio de volumen en las corrientes del sistema (González-Delgado & Aguilar-Vásquez, 2022). La anterior relación se define en la ecuación 4.8, mientras la exergía por trabajo se expone en la ecuación 4.9. Cabe resaltar que la exergía asociada al flujo de calor involucra la eficiencia de Carnot, la cual tiene en cuenta la temperatura de referencia del sistema (Herrera et al., 2022c).

$$Ex_{trabajo} = W \quad (4.8)$$

$$Ex_{calor} = \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) Q \quad (4.9)$$

Dicho lo anterior, se presenta la ecuación 4.10 donde se combina la exergía por trabajo y calor para obtener la exergía por servicios industriales. Por otro lado, Prasakti et al. (2020) plantean que el balance exergético permite calcular la pérdida de exergía para cada equipo, los cuales pueden registrar una pérdida o ganancia de la exergía durante el proceso. La disminución de la exergía proviene de la irreversibilidad intrínseca del proceso, la cual está vinculada a la generación de entropía, determinada por la ecuación 4.11.

$$Ex_{servicios} = Ex_{trabajo} + Ex_{calor} \quad (4.10)$$

$$Ex_{destruida} = Ex_{total\ entrada} - \sum_{j=1}^n Ex_{productos} \quad (4.11)$$

El flujo de exergía puede ingresar a cualquier etapa del proceso de dos maneras distintas: como un flujo de masa o como un servicio industrial, esto implica diversas formas en que la exergía puede ser transferida. De esta forma, el flujo total de exergía que entra en un sistema se encuentra representado por la ecuación 4.12. Para el caso de la exergía que sale del sistema se utiliza la ecuación 4.13. Las anteriores ecuaciones, proporcionan una forma de cuantificar y comprender cómo la exergía sale o ingresa al sistema, permitiendo así un análisis detallado de los procesos y sus contribuciones a la exergía total del sistema.

$$Ex_{total\ entrada} = \sum Ex_{masa} + \sum ex_{servicios} \quad (4.12)$$

$$Ex_{total-salida} = \sum Ex_{productos} + \sum Ex_{residuos} \quad (4.13)$$

Al determinar la eficiencia exergética de un proceso, se considera tanto la cantidad total de exergía que se destruye como las entradas totales de exergía al sistema, tal como se ilustra en la Ecuación 4.14; en consecuencia, este cálculo es una herramienta práctica para entender y optimizar el rendimiento exergético de un sistema dado.

$$\eta_{ex} = 1 - \left(\frac{Ex_{destruida}}{Ex_{total\ entrada}} \right) \quad (4.14)$$

En resumen, la exergía juega un papel esencial en la determinación de la calidad y la porción utilizable de la energía, esta se emplea para evaluar tanto el diseño como la aplicabilidad de un sistema; por consiguiente, El análisis exergético, se emplea para calcular el máximo potencial de trabajo, donde la cantidad de exergía de una corriente está relacionada con sus combinaciones de presión y temperatura, a medida que el sistema transita desde una condición específica de operación hacia una condición estándar (Omidvar et al., 2024). En resumen, los estudios energéticos y exergéticos resultan ser un instrumento valiosos para evaluar el impacto medioambiental de los procesos, esto al cuantificar las pérdidas de energía y las irreversibilidades, estos análisis ofrecen una visión clara de las ineficiencias y las emisiones vinculadas al sistema. Esta información puede orientar el desarrollo de estrategias destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar el aprovechamiento de los combustibles y fomentar la integración de fuentes de energía renovable. Así, el análisis de energía y exergía contribuye al objetivo general de avanzar hacia un sector energético más sostenible y respetuoso con el entorno (Elwardany, 2024).



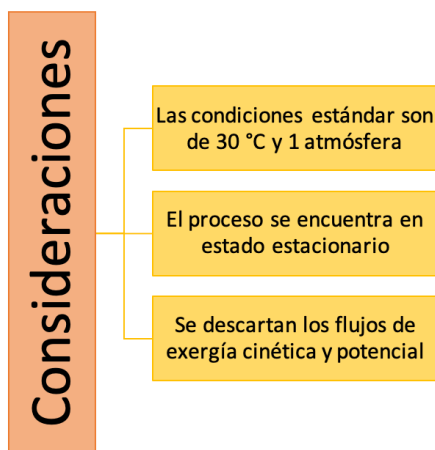


4.2 Condiciones de operación y etapas de proceso

Bertel-Pérez et al. (2023) exponen que llevar a cabo un balance de masa y energía es esencial para evaluar el rendimiento del sistema, dado que este conduce al balance de exergía, el cual registra tanto las entradas como las salidas de exergía de un proceso o sistema, clasificándolas en flujos útiles y residuales. Por medio del análisis exergético, se cuantifica la cantidad de exergía perdida en cada componente del proceso, relacionándola con las exergías netas de transferencia de masa, trabajo y calor en un balance de exergía en estado estacionario. Para ello se tomaron en cuenta las consideraciones planteadas en la Figura 4.1, donde las magnitudes de la exergía cinética y potencial no son relevantes en comparación con las exergías físicas y químicas.

Figura 4.1.

Consideraciones establecidas para el proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



Para llevar a cabo la evaluación exergética del proceso de obtención de aceite de aguacate criollo-antillano, se ha seguido el procedimiento detallado en el capítulo 3 de este libro; dicho proceso, fue modelado con la ayuda del software Aspen Plus, lo que permitió obtener información detallada de cada equipo interviniente en el proceso. Con el fin de facilitar el desarrollo análisis de exergía, hemos agrupado algunos equipos en unidades o etapas del 1 al 8, tal como se describe en la Tabla 4.1. Esta estructuración nos permite analizar de forma integrada los equipos que cumplen funciones complementarias entre sí.

Tabla 4.1.

Etapas descritas para el análisis exergético del proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.

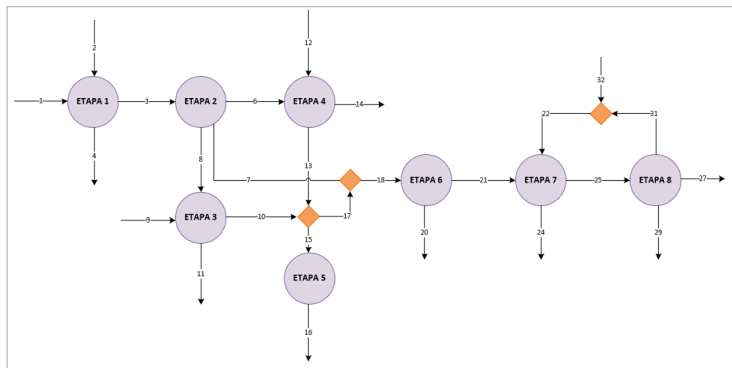
Etapas	Nombre	Descripción
1	Lavado de aguacate	El aguacate se lava con una solución de hipoclorito de sodio para eliminar impurezas.
2	Separación de cáscara y semilla	La pulpa del fruto se separa de la piel y la semilla.
3	Lavado de semilla	Este lavado se utiliza para eliminar la pulpa que queda en la semilla, que luego puede ser utilizada como materia prima para otros procesos.
4	Lavado de cáscara	Este lavado se utiliza para eliminar la pulpa que queda en la cáscara, que luego puede ser utilizada como materia prima para otro proceso.
5	Separación de agua	El agua de las etapas de lavado se separa por centrifugación.
6	Homogeneización y secado	Se forma una pasta uniforme a partir de la pulpa, luego se deshidrata para obtener mejores resultados en la extracción.
7	Extracción de aceite y centrifugación	La pulpa deshidratada se mezcla con hexano (disolvente) para obtener el aceite. Después de eso, la mezcla se centrifuga para eliminar sólidos suspendidos como residuos de pulpa.
8	Destilación, condensación y enfriamiento	El aceite de aguacate y el hexano se separan por diferencia de puntos de ebullición; parte del disolvente se purga y el resto se recircula. La temperatura alcanzada por el aceite en la etapa de destilación se reduce; las condiciones de almacenamiento deben ser cuidadosas ya que las altas temperaturas favorecen los procesos de oxidación. (Robayo, 2016).

En la Figura 4.2 se muestra el orden de los pasos para el proceso de extracción de aguacate, indicando así el número de corriente que ingresa a cada etapa. En la etapa 1, se utiliza agua con hipoclorito de sodio para lavar y desinfectar el aguacate (corriente 2). Se procesan 10,605.00 toneladas por año de aguacate que alimentan el proceso (corriente 1) para obtener 876.01 toneladas por año de aceite de aguacate, utilizando 3,848.65 toneladas por año de hexano como solvente, que es fácil de recuperar y económico (Herrera et al., 2022c). Se introducen 309.21 toneladas por año de hexano fresco en el proceso y se eliminan 109.47 toneladas por año en otra corriente. El proceso se realiza a presión atmosférica y con diferentes temperaturas en cada etapa, siendo el secado a 70 °C para mantener la calidad de la pulpa. El rendimiento de extracción de aceite es del 60.32% en base seca, con una humedad residual del 18.52%.



**Figura 4.2.**

Diagrama de bloques agrupado para el análisis exergético del proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



4.3 Resultados

Utilizando los datos del proceso y los balances de masa y energía, se realizó el cálculo de la exergía para el trabajo y el calor, la eficiencia exergética y las irreversibilidades, para ello resultó necesario conocer las exergías químicas de los componentes del proceso, estas se presentan en la Tabla 4.2, estas fueron consultadas en la literatura, mientras que la del ácido pentadecanoico fue calculada a partir de las exergías estándares de los átomos constituyentes de la molécula.

Las exergías físicas, que representan la capacidad de las corrientes para realizar trabajo útil, de los flujos de materia implicados en el proceso de extracción de aceite de aguacate mediante solvente, fueron determinadas a través de la simulación detallada del procedimiento expuesta en el capítulo 3. Esta simulación permitió evaluar con precisión las propiedades termodinámicas y el potencial de cada corriente dentro del sistema.

Tabla 4.2.

Exergías Químicas de los compuestos involucrados en el proceso de extracción de aceite de aguacate estudiado.

Compuesto	Exergía química (KJ / Kg)	Fuente
Hexano	47696,10	(Ayres et al., 1996)
Hipoclorito de sodio	2286,00	(Lozano García, 2011)
Vapor	527,78	(Ojeda et al., 2009)
Agua	50,00	(Ayres et al., 1996)
Leucina	27802,85	(Tai & Matsushige, 1986)

Compuesto	Exergía química (KJ / Kg)	Fuente
Glucosa	15504,00	(Ojeda et al., 2009)
Óxido de calcio	2269,97	(Ayres et al., 1996)
Acido láurico	37655,17	(Singh et al., 2019)
Ácido mirístico	38743,99	(Singh et al., 2019)
Ácido pentadecanoico	67509,48	Calculated
Ácido palmítico	39581,95	(Singh et al., 2019)
Ácido palmitoleico	39059,31	(Singh et al., 2019)
Ácido heptadecanoico	39970,42	(Singh et al., 2019)
Ácido esteárico	40284,03	(Singh et al., 2019)
Ácido eláídico	42067,70	(Özilgen & Sorgüven, 2011)
Ácido oleico	42067,70	(Özilgen & Sorgüven, 2011)
Ácido linoleico	39294,38	(Singh et al., 2019)
Ácido linolénico	38824,84	(Singh et al., 2019)
Ácido araquídico	40860,03	(Singh et al., 2019)

En la Tabla 4.3, se presentan las exergías físicas asociadas a las corrientes del proceso. Este desglose proporciona una visión detallada de la distribución y magnitud de la capacidad de trabajo útil presente en cada etapa del proceso de extracción de aceite de aguacate, lo que es fundamental para comprender y optimizar la eficiencia del sistema en su conjunto.

Tabla 4.3.
Exergías físicas de las corrientes simuladas para la extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.

Corriente	EX Física (MJ/h)
20	210,48
21	0,95
22	2,51
23	1,82
24	0,06
25	0,42
26	0,61
27	0,04
28	19,50
29	0,59
30	18,92
31	2,69





Para el caso de la exergía de los productos de salida, esta se determina mediante la suma de las exergías relacionadas con la transferencia de masa de las corrientes que salen del proceso y que contienen el producto deseado (Bertel-Pérez et al., 2023). Considerando la información del procedimiento y los balances de masa y energía, se realizaron cálculos relativos a la exergía relacionada con el trabajo y el calor, la eficiencia exergética y las irreversibilidades. Para llevar a cabo este proceso, se recurrió a las exergías químicas de las sustancias involucradas en la operación, provenientes de la Tabla 4.2; seguidamente, se consideraron las exergías físicas de las corrientes del proceso obtenidas de la Tabla 4.3.

Tabla 4.4.

Exergías calculadas para cada etapa del proceso Exergías físicas de las corrientes simuladas para la extracción de aceite de aguacate criollo-an-tillano.

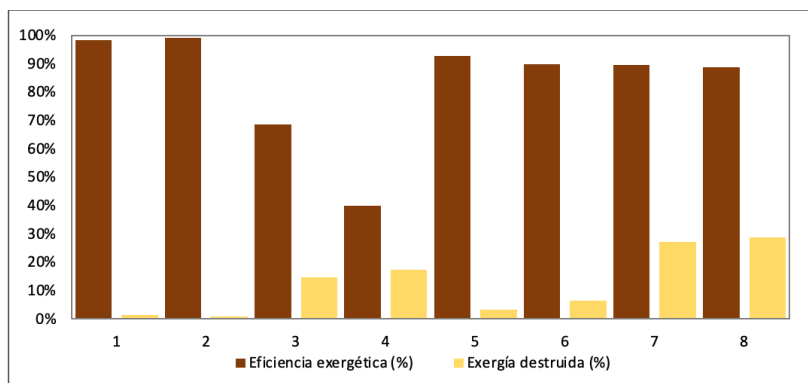
Etapas	Descripción	Exergía- traba- jo (MJ/h)	Exergía – ca- lor (MJ/h)	Perdidas inevitables de exergía (MJ/h)
1	Lavado aguacate	14,40	0,00	17,81
2	Separación de cáscara y semilla	93,60	0,00	83,90
3	Lavado semilla	14,40	0,00	16,52
4	Lavado de cáscara	14,40	0,00	13,84
5	Separación agua	79,20	0,00	67,51
6	Homogenización y secado	378,00	1.689,50	248,33
7	Extracción y centrifu- gación de aceite	414,00	0,00	419,44
8	Destilación, conden- sación y refrigeración	2.181,60	279,49	2.212,63

En la Tabla 4.4 se detallan los cálculos de exergía correspondientes al trabajo del equipo, para ello se consultó la potencia de los equipos, este dato fue adquirido de las especificaciones de los equipos proporcionadas por los proveedores. Con respecto a la exergía relacionada con el calor, se tuvieron en cuenta las etapas conformadas por los procesos donde ocurre cambio de temperatura, como el secado, el enfriamiento del aceite, así como la destilación y condensación de solventes, es decir, las etapas 6 y 8, para ello se utilizó el calor de los equipos en (MJ/h) obtenido de la simulación. Las pérdidas inevitables de exergía se presentan en la última columna de la Tabla 4.4, las mayores pérdidas se presentan durante la etapa de

destilación, condensación y enfriamiento, donde la presión de operación se sitúa en torno a 1 bar, aunque se observa un cambio significativo en la temperatura. Para todas las etapas, es esencial considerar la discrepancia en de potencial químico en las pérdidas inevitables de exergía. La generación de entropía en un proceso conlleva pérdidas de exergía debido a la irreversibilidad (Mugi & Chandramohan, 2021). Por consiguiente, resulta crucial definir el entorno de referencia, teniendo en cuenta variables como temperatura, presión y composición química. Las pérdidas inevitables que se registran en las fases de secado, destilación, condensación y enfriamiento se atribuyen, mayormente a los cambios de temperatura ocurridos.

Figura 4.3.

Indicadores exergéticos por etapa del proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



Teniendo en cuenta que la porción evitable de la pérdida de exergía de un componente se refiere a la porción de pérdida de exergía que se puede impedir mediante la superación de restricciones técnicas inherentes al proceso, tales como su configuración, fabricación, componentes, entre otros aspectos; se considera, a la parte inevitable de la pérdida de exergía de un componente como la cantidad de pérdida de exergía que ocurrirá indudablemente, sin importar la tecnología empleada o cuánto se optimice el diseño del sistema (Prajabati et al., 2024). Una vez cuantificadas las irreversibilidades usamos este dato para obtener la eficiencia exergética y la exergía destruida representadas en la Figura 4.3, donde se destaca las etapas con mayor eficiencia exergética son la separación de la cáscara y la semilla (etapa 2) con un 99.0 % y el lavado del aguacate (etapa 1) con un 98.4 %. Para la etapa 8 que incluye destilación, condensación y enfriamiento, la eficiencia exergética alcanza un 88.5 %, similar a la de la homogeneización

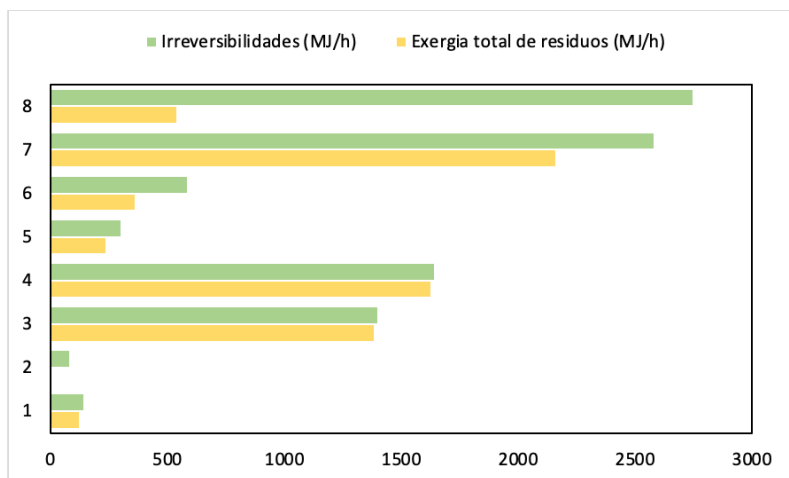




y el secado, que es del 88.3 %. En contraste, la eficiencia exergética más baja se encuentra en el lavado de la cáscara (etapa 4) con un 40.0 % y el lavado de la semilla (etapa 3) con un 66.3 %, debido a la cantidad de residuos generados en estas etapas.

Figura 4.4.

Indicadores exergéticos por etapa del proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



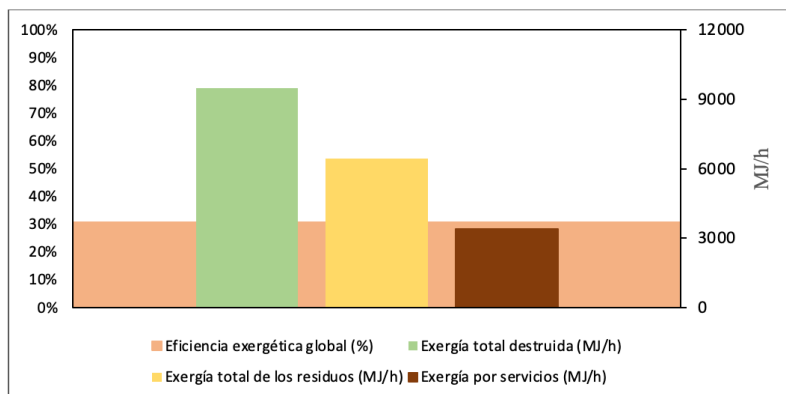
Por otro lado, las principales pérdidas irreversibles que se visualizan en la Figura 4.4 ocurren durante las etapas de destilación, condensación y enfriamiento, debido a una gran entrada de exergía de los servicios; en contraste, las etapas 1 y 2 estas fases muestran menores pérdidas irreversibles. Las mayores irreversibilidades asociadas a la destrucción de exergía causada por la entropía generada durante el funcionamiento de los equipos se reflejan en las etapas 8 y 7 del orden de 2748,90 MJ/h y 2580,74 MJ/h, siendo la menor irreversibilidad de 83,90 MJ/h en la etapa 2. Cabe resaltar que ningún sistema suele ser completamente eficiente y suele presentar irreversibilidades, acorde a la segunda ley de la termodinámica, por lo que no funcionará de manera ideal. La combinación de componentes evitables e inevitables en la pérdida de exergía conforma la pérdida total de exergía (Prajapati et al., 2024). La mayor cantidad de exergía en los residuos se produce durante la etapa 8, debido a la abundancia de residuos de pulpa generados, los cuales contienen agua, solvente, proteínas, ceniza y una proporción reducida de lípidos, con un valor estimado de 2161,30 MJ/h. En contraste con la energía, la exergía puede experimentar reducciones, por tanto, la merma de exergía, referida como irreversibilidad, representa

una de las causas primordiales de la limitada eficiencia en los sistemas de conversión de energía (Karami et al., 2022). A partir del análisis realizado se deduce que la exergía debida a los servicios industriales contribuye en mayor medida durante la etapa 8 que incluye los equipos de destilación, condensación y enfriamiento, representando alrededor del 64 % del total, lo que implica un requerimiento total de 3,447.62 MJ/h para el proceso.

Las pérdidas totales del proceso se estimaron en 9493,56 MJ/h y la eficiencia global del proceso es del 30,69 %, según se muestra en la Figura 4.5, siendo esta eficiencia considerablemente mayor a la reportada por Moreno-Sader et al. (2021) donde la eficiencia exergética global es del 18 % para el proceso de producción de aceite crudo de palma y palmiste en el norte de Colombia, adicionalmente se indican que para este proceso las etapas con mayores irreversibilidades son la trilla y la caldera con valores 52.11% y 39.51% respectivamente. Estos resultados pueden asociarse principalmente a la gran cantidad de residuos generados en todo el proceso, así como a factores como la variabilidad en el tipo de materia prima, la cantidad de producto aprovechado de la misma, el proceso de extracción, los equipos utilizados, así como los requisitos de energía y servicios industriales.

Figura 4.5.

Diagrama de bloques agrupado para el análisis exergético del proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



El costo energético del proceso podría reducirse aprovechando los flujos de calor liberados al ambiente; para lograrlo, es necesario implementar una integración energética como herramienta adicional, que permita optimizar el uso de la energía térmica y, a su vez, reducir este gasto. La exergía debida a los residuos podría disminuir significativamente si se





aprovechan los desechos de semillas, cáscaras y pulpa; además, esto podría contribuir al aumento de la eficiencia exergética general del proceso. La pérdida de exergía es un indicador que revela la cantidad de trabajo que un sistema o equipo ha desperdiciado, por lo tanto, se emplean datos que podrían servir como punto de referencia para ajustar una sección del sistema que experimenta una mayor pérdida de exergía. Omidvar et al. (2024) plantean que, como consecuencia de esta modificación en dicha sección, el sistema experimentará un funcionamiento mejorado y un rendimiento óptimo en comparación con el estado anterior.

El análisis exergético es una herramienta fundamental en la ingeniería de procesos para identificar ineficiencias termodinámicas. Su fortaleza radica en que permite cuantificar las irreversibilidades en las unidades de un sistema y evaluar la eficiencia global en función de la calidad de la energía. Sin embargo, su alcance se limita solo a aspectos termodinámicos, y por tanto presenta limitaciones importantes frente a metodologías más integradas, especialmente cuando se requiere una evaluación completa desde el punto de vista ambiental, económico y sistémico. Para determinar el efecto de la exergía teniendo en cuenta la contribución económica y ambiental, existen análisis exergoeconómicos y exergoambientales, respectivamente, que permiten desarrollar evaluaciones exergéticas con un enfoque integral, teniendo en cuenta más de un punto de vista.

4.3 Conclusiones

Se llevó a cabo un análisis exergético del proceso de extracción de aceite de aguacate con solvente, donde se detectaron las etapas críticas con altas irreversibilidades y pérdidas inevitables de exergía. Este tipo de análisis es beneficioso para evaluar el desempeño del proceso, al identificar la ubicación, tipo y magnitud real de los residuos y pérdidas, contribuyendo así a la meta de un uso energético más eficiente y facilitando el diseño de sistemas térmicos más efectivos mediante la reducción de las fuentes de ineficiencia existentes. Para la conversión de 10,605 toneladas anuales de aguacate en 1,000.66 toneladas anuales de aceite de aguacate, se encontró que la etapa de destilación, condensación y enfriamiento registró las mayores pérdidas de exergía inevitables, con una alta exergía destruida. Además, la centrifugación y el lavado de semillas y cáscaras también presentaron altas pérdidas de exergía. La eficiencia global del proceso se calculó en 30,69%. Se sugiere implementar una integración energética para aprovechar la red de intercambio y reducir el consumo energético.

CAPÍTULO 5

| 87

ASPECTOS DE SEGURIDAD INTRÍNSECA EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE



En el vasto panorama de la ingeniería química, la seguridad inherente de los procesos emerge como un pilar fundamental. Esta disciplina se nutre de una amalgama de conocimientos científicos, tecnológicos y normativas diseñadas para salvaguardar la vida humana, proteger el medio ambiente y preservar los activos industriales. En el corazón de este enfoque radica la premisa de que la seguridad debe estar intrínsecamente integrada en el diseño, la operación y el mantenimiento de los procesos químicos. Es de suma importancia resaltar que la seguridad de los procesos tiene un impacto directo en la rentabilidad económica de la planta, esto se debe a que los costos derivados de incidentes o accidentes pueden ser significativamente mayores que cualquier ahorro obtenido al no invertir en medidas de seguridad (González-Delgado et al., 2022b). La seguridad inherente despliega una filosofía proactiva que busca abordar los riesgos en su origen, en lugar de simplemente mitigar sus consecuencias. Este enfoque implica la identificación y eliminación de peligros en el diseño mismo del proceso, priorizando la selección de materiales y tecnologías intrínsecamente seguras, así como la incorporación de medidas preventivas robustas.

La seguridad ha sido un aspecto primordial en la industria química, remontándose a sus inicios en el siglo XIX durante la fabricación de pólvora negra debido a la latente amenaza de explosión que representaba la molienda del polvo, por lo tanto, E. I. du Pont construyó una edificación de piedra sólida y madera que le permitía disipar la energía de las explosiones y hacia una zona despoblada, sentando inicios de medidas de prevención



en los procesos industriales. Posteriormente, para las décadas de 1970 y 1980, una serie de eventos desafortunados alertaron a la sociedad acerca de la seguridad en la industria, así mismo la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) documentó entre 30 y 40 incidentes significativos anuales desde 1990, donde la industria química, petroquímica y metalúrgica fueron los principales contribuyentes, por lo que se convoca a empresas químicas a colaborar con el fin de encontrar la forma de regular la industria (Mocellin et al., 2022).

La industrialización, aunque conlleva avances y prosperidad, también incluye desafíos e impactos adversos para el medio ambiente y la salud humana, además de aumentar el riesgo de accidentes y problemas de seguridad. Los accidentes vinculados a la industria petrolera pueden ocasionar diversos tipos de daños y lesiones irreparables. Muchos de estos incidentes graves no son resultado de la falta de conocimiento, sino más bien de la ausencia de herramientas adecuadas para analizar dicho conocimiento con precisión. Las instalaciones químicas y de proceso suelen presentar riesgos de inflamabilidad, explosividad y toxicidad. Por consiguiente, la identificación de estos riesgos resulta fundamental para asegurar un diseño y operación seguros de estas plantas. Desde la Revolución Industrial hasta la actualidad, se ha incrementado significativamente el número de técnicas desarrolladas para prevenir accidentes en la industria de procesos (Gupta et al., 2003).

En este capítulo, explicaremos los principios fundamentales de la seguridad inherente en los procesos químicos, examinando sus pilares conceptuales, sus aplicaciones prácticas y un caso de estudio (extracción de aceite de aguacate), siendo nuestro objetivo es ofrecer una visión integral de este campo en constante evolución, destacando su papel crucial en la promoción de un entorno industrial seguro y sostenible.

5.1 Principios de la seguridad inherente

Heikkilä (1999) plantea que la seguridad intrínseca se valora más en las fases tempranas del diseño, durante la selección de la ruta del proceso y la concepción del concepto, para ello exponen los principios básicos de la seguridad inherente basado en los supuestos propuestos por el autor Kletz (1984; 1985).

Figura 5.1.

Principios básicos de la seguridad inherente.

Intensificación
Sustitución
Atenuación
Limitación de efectos
Simplificación
Cambiar temprano
Evitar efectos en cadena
Aclarar el estado
Hacer imposible un montaje incorrecto
Tolerancia
Facilidad de control
Controles/Procedimientos Administrativos

En el diseño de seguridad inherente, se aplican varios principios clave para mitigar riesgos y promover la seguridad, los cuales se mencionan en la Figura 5.1. Estos incluyen la intensificación, que reduce inventarios de materiales peligrosos para prevenir fugas y reducir costos de infraestructura. La sustitución implica reemplazar materiales peligrosos con alternativas más seguras para simplificar la operación y minimizar la necesidad de equipos de protección. La atenuación busca reducir riesgos al llevar a cabo procesos en condiciones menos peligrosas o almacenar materiales de forma menos riesgosa. La limitación de efectos se logra mediante el diseño de equipos que controlan fugas a velocidades bajas, mientras que la simplificación y el cambio temprano identifican riesgos desde las etapas iniciales del diseño, promoviendo la seguridad y evitando costos adicionales. Evitar efectos de propagación implica diseñar plantas para evitar consecuencias en cascada, mientras que la claridad en el estado y el montaje correcto previenen errores y facilitan la operación segura. La tolerancia garantiza que los equipos puedan resistir mal funcionamiento o mantenimiento deficiente sin fallar, y la facilidad de control promueve operaciones seguras y eficientes. Además, procedimientos administrativos como la formación del personal en procedimientos críticos son esenciales para prevenir errores humanos y mantener la seguridad en el lugar de trabajo (Heikkilä, 1999).





5.2 Diferentes métodos de análisis de seguridad

La seguridad inherente de un proceso químico tiene como propósito prevenir y mitigar riesgos mediante la reducción de sustancias peligrosas y operaciones en la planta, en lugar de depender exclusivamente de sistemas de protección adicionales (González-Delgado et al., 2023). En este contexto, diversos métodos y técnicas han sido desarrollados para identificar, analizar y mitigar los riesgos asociados a los procesos químicos. Desde la perspectiva de la ingeniería de seguridad de procesos, estos métodos se centran en la anticipación y prevención de posibles incidentes mediante la evaluación de los peligros y vulnerabilidades presentes en las instalaciones industriales. Para ello exploramos algunos de los métodos más ampliamente reconocidos y utilizados en la evaluación de la seguridad de procesos químicos, incluyendo el Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP), índice de incendio y explosión de DOW, Índice de prototipo de seguridad inherente (PIIS), el índice de seguridad inherente (ISI), entre otros. Estas metodologías proporcionan herramientas sistemáticas para comprender y gestionar los riesgos, permitiendo así tomar medidas proactivas para garantizar la seguridad y fiabilidad de las operaciones.

5.2.1. Índice de prototipo de seguridad inherente (PIIS)

Una de las herramientas pioneras, que sentó las bases para el índice de seguridad inherente es conocida como PIIS desarrollada por Edwards y Lawrence en 1993, esta emplea números enteros discretos para evaluar el nivel de riesgos asociados con productos químicos y procesos, asignando valores más altos a niveles de riesgo más elevados. El nivel general de seguridad inherente se determina mediante la suma de estos números enteros. Aunque el PIIS ha servido como un índice prototipo valioso, su alcance no abarca las características específicas de las reacciones químicas ni la selección de equipos de proceso, aspectos que son considerados por otro índice conocido como (ISI) índice de seguridad inherente (Pu et al., 2023).

El PIIS se concentra en las principales reacciones, dado que se emplea en la fase de investigación y desarrollo (I+D). Los riesgos de seguridad examinados incluyen la inflamabilidad, toxicidad, inventario, temperatura y presión de operación, rendimiento y calor de la reacción. Cada parámetro se desglosa en subcategorías, que se valoran con una puntuación numérica, siendo la ruta de proceso más segura aquella con la puntuación más baja (Raslan et al., 2020). El PIIS aborda los productos químicos como entidades

independientes en lugar de considerarlos como una composición conjunta, por tanto, no logra captar la influencia de distintos elementos en la combinación o mezcla. Además, este enfoque no tiene en cuenta la complejidad del proceso ni la interrelación de múltiples parámetros (Sultana & Haugen, 2022).

5.2.2. HAZOP

El HAZOP, o Estudio de Peligros y Operabilidad, es una metodología empleada para llevar a cabo la evaluación de riesgos en un sistema. Esta técnica se vale de métodos cualitativos que utilizan palabras clave para identificar posibles peligros. Se utiliza para desglosar cada componente de un proceso con el propósito de identificar desviaciones del diseño original y comprender sus causas y efectos. Una vez identificadas las posibles desviaciones, se ajusta el esquema utilizando las palabras clave pertinentes y se evalúa la gravedad de acuerdo con valores predefinidos. Es esencial seguir los estándares establecidos para evaluar los criterios de gravedad, probabilidad y consecuencias (Rusli et al., 2024).

La metodología de análisis HAZOP es una herramienta fundamental en la gestión de riesgos en instalaciones químicas. Este método considera una descripción exhaustiva de un sistema y examina minuciosamente cada una de sus partes para detectar desviaciones de la intención de diseño y evaluar sus causas y repercusiones. Al realizar un análisis completo se consideran situaciones que pueden anticiparse razonablemente a lo largo de la vida útil del sistema y se amplía para abarcar sistemas y sectores más allá de la industria química, siendo el objetivo primordial gestionar de manera efectiva los materiales peligrosos y mitigar los riesgos asociados, buscando activamente todas las posibles fallas que podrían surgir durante el proceso u operación (Mocellin et al., 2022).

Un estudio HAZOP representa una evaluación meticulosa y organizada de un proceso u operación, ya sea en su fase de planificación o en su ejecución. Al inicio el equipo elabora un modelo conceptual del sistema u operación, utilizando toda la información pertinente y disponible, que comprende desde un diseño minucioso y sólido hasta un bosquejo de los procedimientos operativos, junto con datos de materiales y reportes de análisis de riesgos previos. Posteriormente, se identifican peligros y posibles contratiempos operativos, analizando cualquier desviación de la intención de diseño de la sección o etapa en revisión. La intención de diseño





representa una descripción verbal de los procesos esperados, incluyendo todos los aspectos clave que serán examinados durante el estudio, y debe abarcar una definición del rango de operación previsto, el cual suele ser más estricto que las condiciones físicas de diseño. En casos donde el equipo pueda sugerir una causa para las desviaciones, se evalúan las posibles consecuencias basándose en la experiencia del equipo y se consideran las medidas de seguridad existentes. Si el equipo determina que el riesgo es significativo o si alguna cuestión requiere una mayor investigación, se genera un registro formal para dar seguimiento al problema fuera del contexto de la reunión. Posteriormente, el equipo avanza con el análisis, siguiendo un enfoque metódico y estructurado (Crawley & Tyler, 2015).

El proceso HAZOP inicia con la recopilación minuciosa de información del sistema, que abarca la obtención de diagramas de flujo del proceso actualizados (PFD), diagramas de procesos e instrumentación (P&ID), especificaciones de equipos, materiales de construcción, así como balances de masa y energía. Durante la fase de diseño, el HAZOP identifica áreas críticas que requieren la atención de los ingenieros para mitigar riesgos potenciales. Es crucial destacar que el HAZOP no sustituye un diseño robusto. La extensión del HAZOP se define considerando diversos factores, como los límites físicos del sistema, el nivel de detalle necesario, la documentación técnica disponible, investigaciones previas realizadas y requisitos regulatorios, estándares y normativas aplicables. Este procedimiento es liderado por un equipo multidisciplinario encabezado por un facilitador experto en HAZOP. El equipo comprende especialistas en diferentes áreas, como operaciones de planta, laboratorio, técnicos y seguridad, y establecer claramente los roles y responsabilidades es crucial al comienzo del estudio. Incorporar tanto la perspectiva del diseñador como la del usuario del sistema evaluado durante el estudio HAZOP es esencial para asegurar una evaluación integral y eficaz de los riesgos (Mocellin et al., 2022).

5.2.2.1 Pasos para llevar a cabo HAZOP

Para llevar a cabo los estudios de peligrosidad y operabilidad se necesita un equipo conformado por diversos expertos vinculados al área en cuestión. En las industrias de procesos, un equipo multidisciplinario resulta relevante, en el estudio denominado “HAZOP Method in Identification of Risks in a CPFR Supply Chain” los autores Mitkowski y Zenka-Podlaszewska (2014) plantean el procedimiento a seguir para llevar a cabo el Estudio, como indica la figura a continuación:

Figura 5.2.

Pasos para llevar a cabo el método HAZOP.



El proceso inicia con la conformación del equipo de especialistas idóneos, definir y asegurar la comprensión de las palabras guía, realizar diagrama de flujo detallado del proceso y desglosarlo en una serie de pasos, enumerando los parámetros correspondientes, posteriormente, seleccionar el parámetro del proceso, asociar una palabra guía con el parámetro del proceso seleccionado, tener en cuenta si la combinación de una palabra guía y un parámetro del proceso es factible, esto indica posibles desviaciones. Identificar las posibles causas para cada desviación factible, luego evaluar las consecuencias de la desviación identificada, proponer acciones para abordar la desviación, considerando las causas y consecuencias. Seguidamente, se necesita registrar toda la información y pasar a la siguiente palabra guía, repitiendo el proceso hasta que se hayan considerado todas las combinaciones de palabras guía con el parámetro seleccionado, luego debe asegurarse seleccionar el próximo parámetro apropiado y repetir analizar todos los parámetros, finalmente se debe seguir hasta evaluar todas las partes del modelo. Un proceso de gran envergadura podría constar de varias docenas de partes o incluso más. Por ende, la identificación de riesgos con HAZOP podría requerir una cantidad considerable de tiempo (Mitkowski & Zenka-Podlaszewska, 2014).

A pesar de ser una técnica eficaz y bien estructurada, el método HAZOP tiene sus limitaciones, autores plantean que los equipos pueden omi-



tir algunos escenarios, descuidar consideraciones posteriores, caer en la complacencia, enfrentar complejidades en el proceso, encontrar términos ambiguos y experimentar un enfoque decreciente y prolongado en los estudios. Otro inconveniente de esta técnica es el tiempo necesario para llevar a cabo una evaluación exhaustiva de una instalación. plantean que, dependiendo del tamaño de la planta, un equipo de al menos cinco miembros podría requerir de 1 a 8 semanas para completar esta tarea (Penelas & Pires, 2021). Así mismo, equipos menos experimentados pueden carecer del conocimiento necesario para comprender plenamente los problemas asociados con cada palabra guía; Por lo tanto, Trujillo et al. (2015) enumeran una lista de posibles errores que pueden ocurrir durante el proceso:

- Mala gestión de problemas relacionados con la asignación de tiempo.
- Información sobre seguridad del proceso incompleta, inexacta o no disponible.
- Tamaño incorrecto del equipo HAZOP.
- Falta de enfoque durante la reunión.
- Impedir que el equipo realice una lluvia de ideas.
- Confundir las herramientas con el proceso.
- Representar mal o malinterpretar las salvaguardas.
- Recomendaciones excesivas.
- Recomendaciones irrelevantes.
- Recomendaciones excesivamente laxas.
- Intentar resolver la recomendación o diseñar la solución durante el HAZOP.
- Falta de acción por parte de la gerencia ante cada recomendación.
- No actualizar los HAZOP cuando cambia el conocimiento del proceso.

A nivel global, el análisis de peligros y operabilidad (HAZOP) se emplea para llevar a cabo evaluaciones de riesgos en instalaciones de procesamiento. Este enfoque se reconoce como una evaluación apropiada, estructurada y exhaustiva, destinada a identificar los posibles riesgos derivados de fallos en equipos y características de las instalaciones, considerando los impactos resultantes en plantas de proceso nuevas o ya existentes (Penelas & Pires, 2021).

5.2.3 índice de incendio y explosión de DOW

Las plantas químicas, especialmente aquellas involucradas en el pro-



cesamiento y almacenamiento de hidrocarburos presentan un latente riesgo de incendios y explosiones, esto puede derivar en pérdidas humanas, lesiones graves, considerables daños financieros asociados a la destrucción de equipos y la interrupción de la producción, así como en la pérdida de empleo para los trabajadores y daños ambientales irreparables. El Índice de Fuego y Estallido (F&EI) de Dow fue desarrollado con el propósito de detectar e investigar los riesgos asociados con fuegos y explosiones (Gupta et al., 2003). Este índice, no demanda altos niveles de especialización ni detalles técnicos, ya que evalúa de forma global los peligros de las unidades de procesamiento mediante un método sencillo y comprensible (Zaranejad & Ahmadi, 2015). En 1964, Dow Chemical introdujo el índice conocido como el Índice de Incendio y Explosión de Dow (F&EI). Este indicador se fundamenta en aspectos materiales y del proceso y, aunque toma en cuenta datos de la etapa operativa del proceso, puede simplificarse para evaluar atributos de seguridad durante la fase conceptual del diseño. La construcción del F&EI de Dow se apoya principalmente en el componente material, el cual solo representa las propiedades químicas y no las condiciones de operación. A pesar de sus limitaciones, este índice ha sido empleado en el diseño de procesos como una medida de seguridad inherente diversas investigaciones como parte de modelos de optimización que abarcan aspectos económicos y de seguridad inherente (Ortiz-Espinoza et al., 2021).

Los autores Nezamodini et al. (2017) señalan tres principales criterios de selección para este método: La primera es que representa el método más difundido y usado en industrias de procesos donde se almacenan, transportan o procesan agentes inflamables, combustibles o reactivos; Por otra parte, las pérdidas ocasionadas por incendios y explosiones pueden ser calculadas de manera económica y eficaz mediante este índice; adicionalmente, constituye una herramienta de evaluación de los riesgos de incendio y explosión en las industrias químicas fácil de utilizar y que se vale de parámetros disponibles como la temperatura, presión y energía de las sustancias químicas. Resulta importante destacar que las pérdidas estimadas por este método pueden utilizarse como base para determinar los costos de seguro asociados con explosiones e incendios.

Este índice evalúa las amenazas de fuego y explosión en las unidades de procesamiento de forma sencilla, veloz y exhaustiva, al no requerir un grado elevado de especialización ni detalles específicos del procedimiento. A continuación, se indican las etapas planteadas por los autores Zaranejad y Ahmadi (2015) para llevar a cabo el estudio F&EI.

**Figura 5.3.**

Pasos para llevar a cabo el índice de incendio y explosión DOW.



Nota: Elaboración a partir de Zaranejad y Ahmadi (2015).

En la fase inicial del estudio, se recopila información vital sobre la disposición y ubicación de las unidades, equipos, y principales rutas de tuberías y cables examinando el plano del terreno; así mismo, es necesario recolectar información esencial sobre el diseño básico y los materiales utilizados en los procesos a través de los diagramas de flujo de proceso (PFD) y los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID). Posteriormente, se estudian las unidades de procesamiento para una inspección detallada en términos de: materiales, condiciones operativas, registros de daños, y su impacto potencial en el proceso en términos de riesgos de incendio y explosión (Zaranejad & Ahmadi, 2015). Finalmente se calculan los diversos factores detallados en la Figura 5.3.

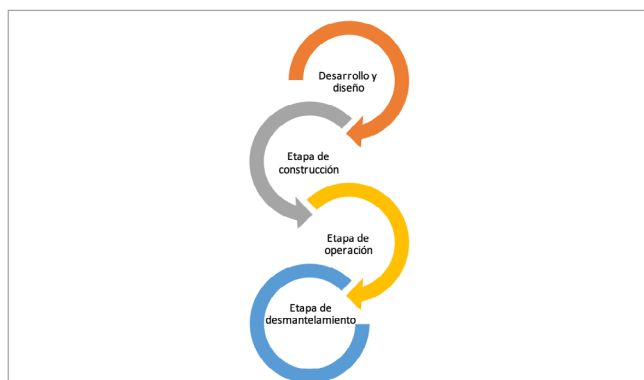
Como ejemplo de aplicación del Índice de Incendio y Explosión de Dow, los autores Gaffney et al. (2021) en el trabajo denominado “Evaluación y análisis de la producción de etileno mediante deshidrogenación oxidativa” determinaron que unidades de proceso eran indispensable tener en cuenta, por lo que estudiaron la cantidad de materiales y las condiciones operativas de las unidades, lo anterior les permitió concluir que la instalación generaría beneficios y que podía aumentar la rentabilidad con la implementación de ciertas mejoras.

5.2.4 Diseño intrínsecamente más seguro (ISD)

Fue propuesto por el profesor Kletz aproximadamente para el año 1978, con sus principios esenciales para suprimir y reducir los riesgos intrínsecos, entre ellos la capacidad de inflamación, la explosividad y la toxicidad, durante la fase de diseño, sin asumir riesgos excesivos (Pu et al., 2023). Este índice integra la evaluación de riesgos en las fases iniciales de diseño e ingeniería con el fin de prevenir peligros en lugar de controlarlos, por tal motivo prioriza la inclusión de características de seguridad en los principios esenciales de diseño, con el fin de evitar depender únicamente de mecanismos de seguridad adicionales. Resulta importante destacar que, en muchas ocasiones, la eliminación total de todos los riesgos puede no ser factible desde el punto de vista técnico o económico, lo que hace necesario que los diseñadores del proceso aborden los riesgos restantes y los reduzcan a un nivel aceptable. Por tal motivo, el ISD destaca la importancia de equilibrar los costos de seguridad a lo largo del proceso, desde la concepción hasta la implementación final (González-Cortes et al., 2023).

Figura 5.4.

Etapas del ciclo de vida de un proceso.



Nota: Elaboración a partir de Yuan et al. (2023).

Los autores Yuan et al. (2023) plantean las cuatro etapas más representativas del ciclo de vida de un proceso ilustradas en la Figura 5.4, recomendando aplicar el ISD en las etapas de diseño conceptual y preliminar, ya que hay más flexibilidad para llevar a cabo modificaciones estratégicas. La implementación de los conceptos y principios del ISD contribuye a reducir la necesidad de depender de barreras de seguridad suplementarias y procedimientos en términos de control de riesgos, lo que resulta en un



menor costo del proyecto. Además, ofrece una visión que facilita la gestión de riesgos y de seguridad, tanto en teoría como en la práctica.

5.2.5. Índice de seguridad inherente (ISI)

El índice de seguridad inherente es ampliamente usado para evaluar procesos, desde que fue propuesto por Heikkilä (1999), este índice se fundamenta en el peso, compuesto por dos subíndices destinados a los productos químicos y a los procesos. El subíndice químico aborda aspectos como la reactividad química, el calor de reacción, la interacción química, la inflamabilidad, la explosividad, la toxicidad y la corrosión. Por su parte, el subíndice de procesos evalúa elementos como el inventario, la temperatura, la presión, la seguridad de los equipos y la estructura segura del proceso (Sultana & Haugen, 2022). La metodología del índice de seguridad inherente (ISI), para calcular el índice de seguridad inherente total I_{TI} , se incluyen dos términos: índice de seguridad química I_{CI} e índice de seguridad de procesos I_{PI} , como ilustra la ecuación 5.1:

$$I_{TI} = I_{ci} + I_{pi} \quad (5.1)$$

Para determinar El Índice de Seguridad Intrínseca Química (I_{CI}), se tienen en cuenta los parámetros incluidos en la ecuación 5.2 determinados por separado para cada sustancia en el proceso, donde se introducen las variables de: Calor de la reacción principal ($I_{RM, \text{máx}}$), el Calor de la reacción secundaria ($I_{RS, \text{máx}}$), la Interacción química ($I_{INT, \text{máx}}$), la Inflamabilidad ($I_{FL, \text{máx}}$), la Explosividad ($I_{EX, \text{máx}}$), la Exposición tóxica ($I_{TOX, \text{máx}}$) y la Corrosividad ($I_{COR, \text{máx}}$), los pesos correspondientes a cada variable se anuncian en la Tabla 5.1.

$$I_{CI} = I_{RM, \text{max}} + I_{RS, \text{max}} + I_{NT, \text{max}} + (I_{FL} + I_{EX} + I_{TOX})_{\text{max}} + I_{COR, \text{max}} \quad (5.2)$$

Tabla 5.1.

Puntuación de parámetros de seguridad para el índice químico.

Índice de Seguridad Intrínseca Química							
Símbolo	$I_{RM, \text{max}}$	$I_{RS, \text{max}}$	$I_{NT, \text{max}}$	$I_{FL, \text{max}}$	$I_{EX, \text{max}}$	$I_{TOX, \text{max}}$	$I_{COR, \text{max}}$
Puntaje	(0-4)	(0-4)	(0-4)	(0-4)	(0-4)	(0-6)	(0-2)

El Índice de Seguridad Intrínseca del Proceso, descrito en la ecuación 5.3 incluye parámetros del propio proceso, como el Inventario (I_I), la Temperatura del proceso ($I_{T, \text{máx}}$), la Presión del proceso ($I_{P, \text{máx}}$), la Seguridad del equipo ($I_{EQ, \text{máx}}$) y la Estructura segura del proceso ($I_{ST, \text{máx}}$), en la Tabla 5.2 se señalan los puntajes de cada variable.



Tabla 5.2.

Puntuación de parámetros de seguridad para el proceso.

$$I_{pi} = I_i + I_{T,max} + I_{P,max} + I_{EQ,max} + I_{ST,max} \tag{5.3}$$

Índice de Seguridad Intrínseca del Proceso						
Símbolo	I_i	$I_{T,max}$	$I_{P,max}$	$I_{EQ,max}$	$I_{EQ,max}$	$I_{ST,max}$
Puntaje	(0-5)	(0-4)	(0-4)	(0-4) OSBL	(0-3) ISBL	(0-5)

El ITI se computa considerando el peor escenario imaginable, para ello se emplean los valores máximos de inflamabilidad, explosividad y toxicidad en cada variable del análisis. Los subíndices de temperatura y presión se obtienen a partir de los registros de las condiciones más elevadas detectadas en el proceso, mientras que el subíndice de inventario refleja la cantidad de masa alojada en el equipo durante un lapso de una hora. Además, se toman en cuenta las interacciones químicas de mayor peligro, así como la integridad del equipo y la estructuración del proceso (Meramo et al., 2019b).

5.2.5.1 Subíndices del Índice de Seguridad Intrínseca Química

El subíndice de seguridad intrínseca química se subdivide en las categorías: subíndices de riesgos de reacción y subíndices de sustancia peligrosa. El primero contiene subíndice de calor de reacción para la reacción principal y la secundaria donde se evalúa la cantidad de entalpía liberada o absorbida en el proceso estudiado, las cuales están categorizadas en la Tabla 5.3 con sus respectivos puntajes; además, se incluye el Subíndice de interacción química el cual implica evaluar las posibles reacciones no deseadas entre las sustancias del proceso y los materiales de la planta, en la Tabla 5.4 se establecen los puntajes.

Tabla 5.3.

Parámetros de determinación de los subíndices de calor de reacción.

Calor de reacción $I_{RM,max}$ y $I_{RS,max}$	Puntaje
Neutra ≤ 200 J/g	0
Levemente exotérmica ≤ 600 J/g	1
Moderadamente exotérmica ≤ 1.200 J/g	2
Fuertemente exotérmica ≤ 3.000 J/g	3
Extremadamente exotérmica ≤ 3.000 J/g	4





Tabla 5.4.
Parámetros de determinación del Subíndice de Interacción Química I_{INT} .

Interacción química	Puntaje
Formación de calor	1-3
Fuego	4
Formación de gas inofensivo, no inflamable	1
Formación de gas tóxico	2-3
Formación de gas inflamable	2-3
Explosión	4
Polimerización rápida	2-3
Sustancias químicas tóxicas solubles	1

Para el subíndice de sustancia peligrosa resulta necesario calcular los subíndices de inflamabilidad, explosividad y exposición tóxica (I_{FL} , I_{EX} y I_{TOX}) para cada sustancia presente en el proceso, y se selecciona la de mayor puntaje. Las sustancias inflamables (tales como gases, líquidos y aerosoles) se perciben como riesgos físicos con potencial para ocasionar grandes accidentes industriales, con repercusiones significativas tanto para la salud humana como para el medio ambiente (Kátai-Urbán et al., 2023). Para el índice de inflamabilidad cuyo puntaje se indica en la Tabla 5.5 resulta necesario conocer el punto *flash* de las sustancias.

Tabla 5.5.
Parámetros de determinación del Subíndice de Inflamabilidad I_{FL} .

Inflamabilidad	Puntaje
No inflamable	0
Combustible (<i>flash point</i> > 55°C)	1
Inflamable (<i>flash point</i> ≤ 55°C)	2
Fácilmente inflamable (<i>flash point</i> < 21°C)	3
Muy inflamable (<i>flash point</i> < 0°C)	4

Para el índice de explosividad se debe considerar que tan propenso es el gas para generar una mezcla explosiva con el aire, los puntajes correspondientes se expresan en la Tabla 5.6. Una explosión se define como una liberación súbita y violenta de energía que causa una explosión con un alto potencial de daño. Esta energía liberada puede ser física, química o nuclear. Asimismo, se clasifican una variedad de explosiones dependiendo del tipo de energía y el entorno de la liberación (Zareei et al., 2015).

Tabla 5.6.Parámetros de determinación del Subíndice de Explosividad I_{EX} .

Explosividad (UEL - LEL) vol%	Puntaje
No explosivo	0
0 – 20	1
20 – 45	2
45 – 70	3
70 – 100	4

Para el subíndice de Exposición Tóxica se tiene en cuenta los valores límite de exposición, como criterio de evaluación, estos se definen como magnitudes de referencia para las concentraciones de diversos agentes químicos, lo que permite su comparación con la realidad a evaluar. En el contexto latinoamericano, los valores de exposición empleados en los EE. UU. se destinan principalmente a los TLV, los cuales se ajustan según la métrica de tiempo (Mora-Barrantes et al., 2022). En la Tabla 5.7 se detalla los valores en partes por millón (ppm) para cada puntaje.

Tabla 5.7.Parámetros de determinación del subíndice de Exposición Tóxica I_{TOX} .

Limite toxicidad (ppm)	Puntaje
TLV > 10.000	0
TLV ≤ 10.000	1
TLV ≤ 1.000	2
TLV ≤ 100	3
TLV ≤ 10	4
TLV ≤ 1	5
TLV ≤ 0,1	6

Tabla 5.8.Parámetros de determinación del subíndice de Corrosividad I_{COR} .

Material de Construcción	Puntaje
Acero al carbono	0
Acero inoxidable	1
Material requerido	2

Por otro lado, el subíndice de corrosividad (I_{COR}) se establece en relación con la sustancia química más corrosiva (Heikkilä, 1999), se calcula considerando el material requerido para la construcción de los equipos, como se indica en la Tabla 5.8. Estos subíndices se suman individualmente para cada sustancia, y





la suma máxima se utiliza como el valor del subíndice de sustancia peligrosa.

5.2.5.2 Subíndices para el Índice de Seguridad Intrínseca del Proceso

El índice de seguridad inherente de proceso (IPI) refleja la seguridad inherente en relación con los equipos y los parámetros de operación. Este índice se ha subdividido en sub índices que abarcan el inventario, la temperatura, la presión, la seguridad del equipo y la estructura segura del proceso (González-Delgado et al., 2022b).

Tabla 5.9.

Parámetros de determinación del subíndice de Inventario I_T .

Inventario		Puntaje
ISBL	OSBL	
0–1 t	0–10 t	0
1–10 t	10–100 t	1
10–50 t	100–500 t	2
50–200 t	500–2.000 t	3
200–500 t	2000–5.000 t	4
500–1.000 t	5000–10.000 t	5

El subíndice de inventario identifica los riesgos vinculados a la retención de una cantidad precisa de sustancias. Tanto los límites de batería interna (ISBL) como los límites de batería externa (OSBL) se consideran en este cálculo, tomando en cuenta los flujos durante un tiempo específico medido en toneladas por hora (González-Delgado, Aguilar-Vásquez & Ramos-Olmos, 2023). Posteriormente, se asignan puntuaciones de acuerdo con estos parámetros, tal como se presenta en la Tabla 5.9. Por otro lado, la Tabla 5.10 muestra los puntajes asignados acorde a la temperatura máxima en el área de proceso estudiado.

Tabla 5.10.

Parámetros de determinación del subíndice de temperatura del proceso I_T .

Puntaje	
< 0 °C	1
0–70 °C	0
70–150 °C	1
150–300 °C	2
300–600 °C	3
>600 °C	4

Tabla 5.11.

Parámetros de determinación del subíndice de Presión de Proceso I_p .

Presión de proceso	Puntaje
0.5–5 bar	0
0–0.5 o 5–25 bar	1
25–50 bar	2
50–200 bar	3
200–1000 bar	4

Para la asignación del subíndice de presión de proceso se contempla la presión máxima en la planta diseñada para efectos del estudio en condiciones normales de operación y se asigna el puntaje correspondiente con la Tabla 5.11. Por lo que se refiere al índice de seguridad de equipos, se establecen los puntajes en la Tabla 5.12. La evaluación de la seguridad del equipo se basa en datos cuantitativos de accidentes y fallos, así como en prácticas y recomendaciones de ingeniería, y depende tanto del equipo en sí como de las condiciones de proceso.

Tabla 5.12.

Parámetros de determinación del subíndice seguridad de equipos IEQ para ISBL y OSBL.

	Equipos	Puntaje
ISBL	Equipos que manejan materiales no inflamables y no tóxicos	0
	Intercambiadores de calor, bombas, torres, tambores	1
	Enfriadores de aire, reactores, bombas de alto riesgo	2
	Compresores, reactores de alto riesgo	3
	Hornos, calentadores a fuego	4
OSBL	Equipos que manejan materiales no inflamables y no tóxicos	0
	Tanques de almacenamiento atmosférico, bombas	1
	Torres de refrigeración, compresores, sistemas de purga, tanques de almacenamiento presurizados o refrigerados	2
	Calderas, hornos	3

González-Delgado et al. (2022b) exponen que, para el subíndice de seguridad del equipo, la planta de proceso se divide en dos áreas con distintas características de seguridad. El área in situ, o área de límites de la batería interna (ISBL), concentra una gran cantidad de equipos y tuberías en un espacio reducido, donde se realiza la transformación de materias primas en productos. Por otro lado, el área de límites externos o fuera de



la batería (OSBL) alberga grandes inventarios de fluidos, frecuentemente inflamables o tóxicos. Aunque el número de equipos en el área OSBL es menor, su tamaño es mayor que en el área ISBL. Además, el diseño disperso en OSBL contribuye a mejorar la seguridad en comparación con ISBL.

Tabla 5.13.

Parámetros de determinación del subíndice de Estructura de Proceso Seguro I_{ST} .

Nivel de seguridad de la estructura del proceso	Puntaje
Recomendado (seguridad, etc. estándar)	0
Práctica común en ingeniería	1
Sin datos o neutral	2
probablemente inseguro	3
Accidentes menores	4
Accidentes mayores	5

El subíndice de estructura segura de procesos detalla los riesgos operativos desde una perspectiva de ingeniería de sistemas, basados en los parámetros de la Tabla 5.13. En este contexto, se evalúa la eficacia de la coordinación entre operaciones unitarias y otros componentes del proceso, es decir, cómo deben interconectarse y controlarse de manera integrada (González-Delgado et al., 2022b).

5.3 Resultados

Se llevó a cabo una evaluación del proceso, focalizada en la seguridad, empleando la metodología del Índice de Seguridad Inherente (ISI). Esta metodología se destaca por su capacidad para proporcionar una evaluación integral de la seguridad inherente en los procesos químicos durante las etapas de diseño conceptual.

5.3.1 Cálculo del subíndice por reacciones químicas

Los subíndices $I_{RM,max}$ e $I_{RS,max}$ se refieren al indicador de reacción química para reacciones principales y secundarias, respectivamente. En el proceso de extracción de aceite crudo de aguacate, no se observaron reacciones químicas, lo que resultó en una puntuación de 0 para estos indicadores, al igual que para el $I_{INT,max}$, que evalúa las reacciones no deseadas entre las sustancias de proceso y los materiales presentes en el área de la planta, así como el n-Hexano. Para la obtención de aceite de aguacate uti-



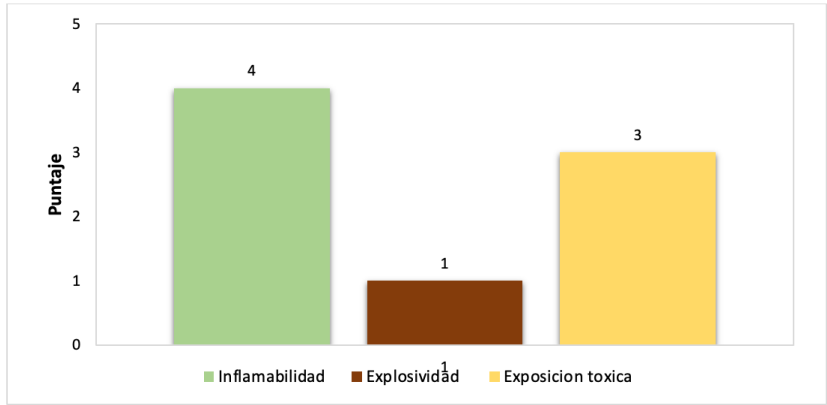
lizando un solvente, se consideran parámetros como la inflamabilidad, la explosividad y la toxicidad para identificar materiales peligrosos. En este contexto, el componente con mayor riesgo identificado para el proceso fue el hexano empleado en la etapa de extracción. No obstante, otras sustancias dentro del proceso demostraron ser seguras debido a su carácter no inflamable, no tóxico y no explosivo (Zuorro et al., 2021).

Tabla 5.14.
Propiedades del solvente usado para la extracción del aceite de aguacate.

Propiedad	Valor	Unidad
Límite de explosión	7,7	%
Punto de ebullición	68,5	°C
TLV	50	PPM
Flash point	-23	°C

Los datos de interés tomados de la ficha de seguridad del hexano se presentan en la Tabla 5.14. En el contexto de la inflamabilidad, el punto de ebullición se erige como una medida fundamental del riesgo inherente (Heikkilä, 1999); en este sentido, el hexano se clasifica como altamente inflamable, caracterizado por un punto de inflamación inferior a cero. Por otro lado, la explosividad indica la tendencia de los componentes a formar una mezcla explosiva en el aire y está directamente vinculada a los límites de explosión superior e inferior. En esta categorización, el hexano se considera moderadamente explosivo, con valores que oscilan entre 0 y 20%. Asimismo, el indicador de toxicidad se emplea en el ámbito industrial para salvaguardar la salud de los trabajadores durante sus labores.

Figura 5.5.
Puntajes calculados por categoría para el subíndice por reacciones químicas.





Para concluir el análisis químico, se evaluó la corrosión en relación con el material elegido para la fabricación de los equipos; dado que la corrosión del acero dulce por ácidos grasos es despreciable a temperatura ambiente (Chong, 2004), no es necesario emplear ningún material especial para los equipos de proceso. La Figura 5.5 ilustra el puntaje obtenido por categoría.

5.3.2 Subíndice por condiciones de proceso

En esta sección se considera el inventario, la temperatura operativa, la presión, la integridad de los equipos y la estructura. Los flujos de masa de los equipos participantes en el proceso se derivan de la simulación, y se encuentran detallados en la Tabla 5.15, que se presenta a continuación:

Tabla 5.15.

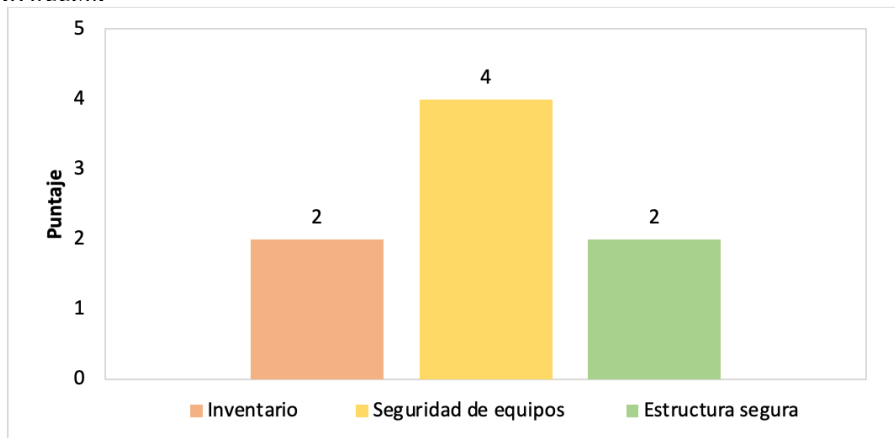
Cálculo del subíndice de inventario.

Nº	Equipos	Flujo (t/año)	Inventario (t)
1	Lavado de aguacate	32259,00	3,68
2	Separación de cáscara	11967,36	1,37
3	Separación de pulpa	10018,42	1,14
4	Lavado de semillas	3033,62	0,35
5	Lavado de cáscaras	6148,95	0,70
6	Separación de agua	6969,97	0,80
7	Homogenización	8075,37	0,92
8	Secado	8075,37	0,92
9	Extracción de aceite	5443,15	0,62
10	Centrifugación de aceite	5443,15	0,62
11	Destilación de hexano	4645,26	0,53
12	Condensación de hexano	3535,88	0,40
13	Refrigeración de aceite	1000,01	0,11
TOTAL			12,17

Los subíndices relativos a la temperatura y presión fueron determinados de acuerdo con las condiciones operativas del proceso; se estimó que la temperatura máxima alcanzaría los 70 °C durante la etapa de secado y destilación. Respecto a la presión de operación de la planta, se ha establecido en 1 bar para la mayoría de las etapas, por lo que las condiciones de presión no representan un riesgo significativo.

Figura 5.6.

Puntajes calculados por categoría para el subíndice por condiciones de proceso.



Se evaluó el índice de seguridad de los equipos en el área ISBL debido a la presencia de una etapa que requiere horno para la destilación y secado; como resultado, se asignó el puntaje máximo de 4. Con relación al subíndice que aborda la integridad estructural del proceso, este fue calificado como posiblemente inseguro en dicho apartado teniendo en cuenta lo propuesto por el autor Guillén (2016). La Figura 5.6 ilustra los totales calculados para cada variable del subíndice por condición de proceso.

5.3.3. Índice de Seguridad Intrínseca total (ITI)

Los resultados obtenidos del análisis de seguridad inherente, específicamente aplicados a la extracción de aceite de aguacate, se detallan en la Tabla 5.16, ofreciendo una visión detallada de cada índice de seguridad evaluado.





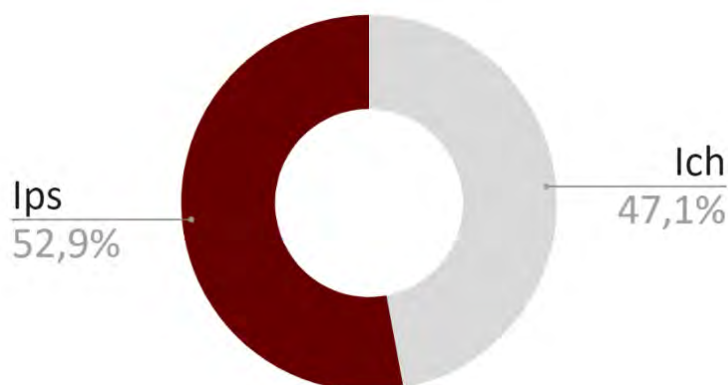
Tabla 5.16.
Puntajes asignados para cada variable del índice de Seguridad Intrínseca calculado para el proceso de extracción de aceite de aguacate Criollo-An-tillano.

Índice	Subíndice	Puntaje
Ich (seguridad inherente química)	Calor de reacción principal	0
	Calor de reacción secundaria	0
	Interacción química	0
	Inflamabilidad	4
	Explosividad	1
	Exposición tóxica	3
	Corrosividad	0
	Subtotal	8
Ips (índice de Seguridad Intrínseca del Proceso)	Inventario	2
	Temperatura de proceso	0
	Presión de proceso	0
	Seguridad de equipos	4
	Estructura segura	3
	Subtotal	9
ISI	TOTAL	17

La Figura 5.7 ilustra la distribución de puntajes del índice para el proceso de obtención de aceite de aguacate estudiado en este libro, donde se puede notar que el subíndice por condiciones de proceso tiene mayor influencia en el resultado total. El Índice Total de Seguridad Intrínseca (ITI) de 17 corresponde al índice de seguridad inherente de procesos (ISI) para la extracción de aceite de aguacate crudo, el cual excede la puntuación obtenida por los autores González-Delgado et al. (2021) en su investigación sobre la producción de aceite de palma crudo utilizando parámetros de seguridad inherente, donde obtuvieron un puntaje de 11. Esto sugiere un proceso más seguro, aunque el mayor riesgo se localiza en el subíndice de seguridad del equipo de proceso, especialmente debido a la instalación de una caldera y un secador. A pesar de que ambos procesos se consideran seguros discrepan en el ITI total, lo cual se debe a las particularidades de cada proceso, incluyendo el método de extracción empleado y la aplicación de solventes en la extracción de aceite crudo de aguacate.

Figura 5.7.

Índice de Seguridad Intrínseca calculado para la extracción de aceite de aguacate Criollo-Antillano.



Es fundamental considerar la seguridad del proceso como herramienta para respaldar la toma de decisiones y evitar la degradación de los sistemas según plantean los autores Santos et al. (2019). La evaluación de seguridad es esencial para controlar los peligros y disminuir su magnitud, y puede integrarse en todas las fases de diseño y operación. Sin embargo, el empleo de la seguridad inherente desde la etapa de selección del proceso y el diseño conceptual produce los resultados óptimos, fomentando un rendimiento esencial que incluye consideraciones ambientales, de salud y de seguridad (Herrera et al., 2022a).

5.4 Conclusiones

En este estudio se llevó a cabo un análisis de la seguridad inherente en la extracción a gran escala de aceite de aguacate crudo mediante el uso de hexano. Los resultados indican que, para una instalación con una capacidad de procesamiento de 10,604 toneladas por año, el proceso es intrínsecamente seguro, obteniendo un índice total de seguridad inherente de 17, por debajo del umbral establecido para un proceso neutral o seguro. La evaluación revela una evaluación desequilibrada en los índices de seguridad química y de proceso inherente. Las condiciones operativas y termodinámicas de las reacciones no suscitan preocupaciones significativas para la seguridad inherente de este proceso, dado que temperaturas de 70 °C y presiones de 1 bar no representan amenazas. No obstante, la inflamabilidad y la seguridad del equipamiento son áreas de riesgo a considerar. Es





fundamental reconocer que, aunque el proceso puede ser intrínsecamente seguro según un criterio, puede ser poco confiable desde otra perspectiva. En relación al subíndice químico, la elección adecuada de materiales de construcción puede prevenir problemas de seguridad derivados de las propiedades corrosivas de sustancias y corrientes de proceso. Por otro lado, el subíndice de estructura de proceso seguro analiza la seguridad del proceso desde una perspectiva de ingeniería, evaluando la integración y control de las operaciones unitarias; además, es esencial cuantificar el inventario, ya que el riesgo potencial se incrementa con el tamaño de la planta (Herrera et al., 2022a).

CAPÍTULO 6

ASPECTOS AMBIENTALES EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE

| III



En la actualidad, se observa claramente un creciente interés por parte de los gobiernos y la comunidad académica en la implementación de estrategias destinadas a la preservación de los recursos naturales, siendo una tendencia de rápido incremento en los últimos años. Recientemente, se ha prestado mucha atención a la aplicación de los principios del desarrollo sostenible en diversas industrias e instalaciones de procesos químicos. Una de las preocupaciones más destacadas se centra en la gestión adecuada de los residuos sólidos y en la creciente demanda y generación de energía. Además, se ha puesto especial énfasis en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que plantea desafíos significativos para la sostenibilidad ambiental (Meramo-Hurtado et al., 2020a).

El fenómeno del calentamiento global está estrechamente ligado a las emisiones de gases de efecto invernadero; Por tanto, la liberación de una cantidad masiva de carbono, equivalente a un billón de toneladas, en la atmósfera puede resultar en un aumento máximo de temperatura de alrededor de 2 °C. Esta conexión entre emisiones y aumento de temperatura subraya la importancia de controlar y reducir las emisiones para mitigar el cambio climático. En el contexto de sistemas de energía, la contaminación atmosférica proviene principalmente de la quema de combustibles en los generadores tradicionales, debido a esto, la cantidad de emisiones de carbono y otros contaminantes está directamente vinculada a la cantidad de combustible consumido anualmente por estos generadores (Aziz et al., 2022). Esto resalta la necesidad de promover el uso de fuentes de energía



más limpias y eficientes para reducir las emisiones y minimizar el impacto ambiental, así mismo de estudiar y evaluar los impactos de un proceso por medio de la implementación de metodologías de evaluación ambiental.

La implementación de metodologías de evaluación ambiental en procesos químicos implica una evaluación exhaustiva de los posibles beneficios que pueden surgir de la evaluación de múltiples categorías de impacto. Además, implica llevar a cabo una evaluación cuantitativa de las tasas de impacto total, lo que permite una comprensión más profunda de cómo las actividades químicas afectan al medio ambiente. Esto implica examinar minuciosamente los efectos ambientales de estas actividades, lo que nos brinda una visión más completa de su repercusión en el entorno circundante (Meramo-Hurtado et al., 2020b).

La evaluación ambiental se emplea para analizar los posibles impactos ambientales de una actividad industrial, tanto presente como futura, que pueda conllevar desequilibrios ecológicos o exceder los límites establecidos en las regulaciones para la protección del ecosistema. Este proceso permite identificar y prever los efectos negativos que una actividad industrial podría tener sobre el medio ambiente, asegurando así la toma de medidas preventivas y correctivas para mitigar su impacto. Además, facilita la planificación de estrategias sostenibles que promuevan el desarrollo económico en armonía con la conservación del entorno natural (González-Delgado et al., 2022c).

6.1 Cálculo del impacto ambiental por medio del algoritmo de reducción de residuos

El análisis ambiental del proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano usando hexano como solvente se realizó empleando el algoritmo de reducción de residuos, de licencia gratuita WARGUI. Esta herramienta permite detallar la generación del impacto ambiental de un proceso químico al aprovechar la información relativa a los flujos de masa y la composición de las corrientes de entrada y salida del proceso, así como los datos toxicológicos asociados a las sustancias que integran dichas corrientes (Pertuz et al., 2023).

El algoritmo de mitigación de impactos WAR es una metodología elaborada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para evaluar el potencial de impacto ambiental (PEI) asociado a un proceso

químico. Esta herramienta permite determinar cuál proceso es más favorable en términos de generación de PEI, considerando tanto los residuos de salida como el consumo energético (Meramo-Hurtado et al., 2020b). El algoritmo WAR realiza el cálculo del PEI basándose en ocho categorías distintas. Este enfoque sistemático proporciona una visión integral del impacto ambiental de un proceso químico, facilitando la toma de decisiones en la selección de alternativas más sostenibles desde el punto de vista ambiental. Además, al evaluar múltiples categorías, el algoritmo WAR permite una comprensión detallada de los diversos aspectos que contribuyen al impacto ambiental total de un proceso, lo que resulta fundamental para identificar áreas de mejora y optimización.

El algoritmo WAR emplea tanto los balances de materia como los de energía, en combinación con la información sobre las especies químicas y la energía, a través de una evaluación del impacto potencial ambiental (PEI). Este PEI se concibe como la repercusión que tendrían tanto la materia como la energía si fueran liberadas directamente al entorno, teniendo una naturaleza probabilística y mostrando variaciones en circunstancias particulares. Estos valores de PEI se determinan utilizando medidas concretas, como caudales y la composición de los flujos, entre otros aspectos. La evaluación del impacto se extiende tanto al proceso químico como a la producción de energía asociada a dicho proceso. Este enfoque analítico establece que el impacto ambiental potencial puede manifestarse de diversas maneras, ya sea como entrada, salida, generación o acumulación dentro del sistema (Aguilar Vásquez & González-Delgado, 2021).

6.1.1. Impactos potenciales

El algoritmo de reducción de residuos, conocido como algoritmo WAR, se posiciona como una de las herramientas clave para realizar un análisis de los impactos ambientales asociados a los procesos industriales, especialmente en el ámbito de la industria química. Este algoritmo se encarga de calcular la generación de los impactos ambientales potenciales (PEI) que resultan de las actividades llevadas a cabo en un proceso (Ortiz-Sánchez et al., 2020). Una característica destacada del algoritmo WAR es su capacidad para abordar la evaluación desde dos perspectivas distintas: por un lado, considera la producción de PEI, que cuantifica el impacto de PEI liberado al medio ambiente como resultado directo del proceso; por otro lado, evalúa el PEI generado, que analiza la cantidad de PEI producido internamente dentro de los límites del propio proceso. Esta





doble vertiente del análisis proporciona una visión completa de los impactos ambientales, tanto en términos de emisiones al entorno como de generación interna de residuos (Cassiani-Cassiani et al., 2018); teniendo en cuenta lo anterior, los impactos ambientales potenciales se subdividen en generados y de salida.

6.1.1.1 Impactos ambientales potenciales (PEI) generados

Determinan la generación de PEI dentro de los límites del proceso, lo cual es crucial para comprender la eficiencia ambiental interna del mismo. Esta eficiencia se refiere a la cantidad de potencial de impacto ambiental que se consume durante la realización del proceso (González-Delgado et al., 2022a). Esencialmente, este enfoque busca determinar la cantidad de recursos naturales y energía que se requieren para llevar a cabo el proceso y cómo esto se traduce en la generación de impactos ambientales. En última instancia, este análisis permite evaluar cómo se manejan los recursos durante el proceso y cómo se pueden implementar mejoras para reducir el impacto ambiental asociado con la actividad. El PEI, o Potencial de Impacto Ambiental, según plantean los autores Meramo-Hurtado et al. (2020b), se describe como una medida del efecto que puede tener la liberación o emisión de cualquier compuesto o sustancia que está involucrada en el proceso en el medio ambiente. Este índice es evaluado por el algoritmo desde dos perspectivas distintas: la tasa de producción de PEI y la tasa de generación de PEI. Esta metodología permite una comprensión más completa de cómo las actividades y procesos pueden afectar el entorno, al considerar tanto la cantidad de impacto producido como la cantidad generada internamente en el sistema.

$$\hat{i}_{gen}^{(t)} = i_{out}^{(cp)} - i_{in}^{(cp)} + i_{out}^{(ep)} - i_{in}^{(ep)} + i_{we}^{(cp)} + i_{we}^{(ep)} = \sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k - \sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(in)} \sum_k X_{kj} \Psi_k + \sum_j^{ep-g} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \hat{i}_{gen}^{(t)} &= \frac{i_{out}^{(cp)} - i_{in}^{(cp)} + i_{out}^{(ep)} - i_{in}^{(ep)} + i_{we}^{(cp)} + i_{we}^{(ep)}}{\sum_p P_p} \\ &= \frac{\sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k - \sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(in)} \sum_k X_{kj} \Psi_k + \sum_j^{ep-g} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k}{\sum_p P_p} \end{aligned} \quad (6.2)$$

La ecuación 6.1 representa la expresión para calcular el impacto ambiental potencial (PEI) generado por unidad de tiempo, mientras la ecuación 6.2 expresa el impacto ambiental potencial (PEI) generado por uni-



dad de masa. Las variables de las ecuaciones presentadas se indican como \dot{m}_{in} y \dot{m}_{out} siendo estas expresiones las velocidades de ingreso y salida de PEI del sistema debido a las interacciones químicas que ocurren dentro del sistema; por otra parte \dot{m}_{in}^{ep} y \dot{m}_{out}^{ep} son las velocidades de ingreso y salida de PEI del sistema debido a los procesos de generación de energía en el sistema; adicionalmente \dot{m}_{out}^{ep-g} corresponde a los impactos de salida del sistema como resultado de la liberación de energía no aprovechada y \dot{m}_{in}^{ep} a los procesos químicos que ocurren dentro del sistema. Para el caso de \dot{m}_{in}^{cp} y \dot{m}_{out}^{cp} son los flujos másicos de entrada y salida de la corriente j ; mientras x_{kj} es la fracción másica del componente k en la corriente j ; ψ_k expresa el impacto ambiental potencial global de la sustancia química k y P_p es el flujo másico del producto p (González-Delgado et al., 2022b).

6.1.1.2 Impactos ambientales potenciales (PEI) de salida

Cuantifican el impacto de PEI emitido por el proceso, lo cual es fundamental para abordar cuestiones relacionadas con la eficiencia ambiental externa del mismo. Esta eficiencia se refiere a la habilidad del proceso para producir productos finales con una mínima carga de impacto ambiental potencial. Esencialmente, este enfoque busca responder interrogantes sobre cómo el proceso interactúa con su entorno y cuál es su contribución al deterioro ambiental, centrándose en la reducción de dichos impactos para garantizar una producción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente (González-Delgado et al., 2022b).

$$\begin{aligned} \hat{i}_{out}^{(t)} &= i_{out}^{(cp)} + i_{out}^{(ep)} + i_{we}^{(cp)} + i_{we}^{(ep)} = \sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k x_{kj} \psi_k + \\ &\sum_j^{ep-g} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k x_{kj} \psi_k \quad (6.3) \\ \hat{i}_{out}^{(t)} &= \frac{i_{out}^{(cp)} + i_{out}^{(ep)} + i_{we}^{(cp)} + i_{we}^{(ep)}}{\sum_p P_p} \\ &= \frac{\sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k x_{kj} \psi_k + \sum_j^{ep-g} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k x_{kj} \psi_k}{\sum_p P_p} \quad (6.4) \end{aligned}$$

Según Meramo-Hurtado et al. (2020b), el índice PEI se presenta como una métrica con una naturaleza probabilística intrínseca, lo que implica que su valor es una cantidad conceptual que debe ser calculada a partir de variables que pueden ser medidas. Esto resalta la importancia de recopilar datos precisos y confiables para llevar a cabo una evaluación precisa del impacto ambiental en un proceso químico. La comprensión de esta



naturaleza probabilística del PEI es crucial para interpretar adecuadamente su significado y utilizarlo como una herramienta efectiva en la toma de decisiones relacionadas con la gestión ambiental y la sostenibilidad.

6.1.2. Categorías atmosféricas

Las clasificaciones atmosféricas, se subdividen en dos tipos: las de alcance global y las de alcance regional, las primeras cuantifican las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y la cantidad de ozono (O_3), es decir, potencial de calentamiento global y Potencial de agotamiento del ozono, respectivamente. Así mismo, se encuentran las de alcance regional, que analizan el potencial de acidificación debido al dióxido de azufre (VSO_2) y la variación en la emisión de etileno (C_2H_4), esto se refiere al Potencial de acidificación y Potencial de oxidación fotoquímica en el mismo orden (Herrera et al., 2022b).

6.1.2.1 Potencial de calentamiento global (GWP)

El Potencial de Calentamiento Global (GWP) se cuantifica en equivalentes de kilogramos de CO_2 y puede ser computado mediante la Ecuación 6.5, y representan la concentración del gas de efecto invernadero i y la concentración de dióxido de carbono en un momento t después de su liberación, siendo t el número de años sobre el cual se desea evaluar el GWP, generalmente se toma como referencia un periodo de 100 años (González-Delgado et al., 2022b); adicionalmente, simboliza la masa del gas emitido, mientras representan la absorción de calor por radiación por unidad de gas de efecto invernadero, en cuanto a la variable i esta describe la absorción de calor por radiación por unidad de gas de efecto invernadero i y por unidad de dióxido de carbono, respectivamente (Aguilar Vásquez & González-Delgado, 2021).

$$GWP = \frac{\int_0^t a_i c_i(t) dt}{\int_0^t a_{\text{CO}_2} c_{\text{CO}_2}(t) dt} m_i \quad (6.5)$$

El Potencial de Calentamiento Global (GWP) puede ser empleado para comprender las emisiones totales de un sistema, ya que convierte las emisiones de gases de efecto invernadero en equivalentes de CO_2 , y es un indicador ampliamente reconocido para evaluar los impactos ambientales de un sistema (Cho et al., 2023). El GWP se establece como una métrica que evalúa la capacidad de un gas para retener energía a lo largo del tiempo. Este índice se calcula mediante la comparación con la métrica estándar del equivalente de dióxido de carbono total (CO_2 eq.). Esta medida propor-

ciona una manera de cuantificar y comparar el impacto climático de gases de efecto invernadero, permitiendo una evaluación más completa de su contribución al cambio climático (Meramo-Hurtado et al., 2020b). La utilización del CO₂ eq. como referencia facilita la comprensión de la magnitud del impacto de un gas en relación con el dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero bien conocido y ampliamente estudiado. Esto resulta fundamental para la formulación de políticas y estrategias destinadas a mitigar los efectos del cambio climático y promover un desarrollo sostenible.

6.1.2.2 Potencial de agotamiento del ozono (ODP)

El potencial de depleción de ozono (ODP) es un indicador que tiene en cuenta la descomposición de sustancias químicas en la atmósfera. Se determina mediante la comparación de la velocidad de reacción de una cantidad específica de un compuesto químico con el ozono para producir oxígeno molecular, con la velocidad de reacción de la misma cantidad de CFC-11 (triclorofluorometano) que reacciona con el ozono para formar oxígeno molecular. Este análisis permite evaluar el impacto potencial de diversas sustancias en la capa de ozono y contribuye a comprender su papel en el agotamiento de este importante componente atmosférico (González-Delgado, Ramos-Olmos & Aguilar-Vásquez, 2023). La ecuación 6.6 describe el potencial de agotamiento o adelgazamiento de la capa de ozono, para ello se refiere al agotamiento de ozono global producido por una unidad del gas i , es el agotamiento de ozono producido por una unidad de CFC-11 y m_i es la masa (kg) del gas emitido.

$$ODP = \frac{\delta[O_3]_i}{\delta[O_3]_{CFC-11}} m_i \quad (6.6)$$

Los daños en el ozono estratosférico, o capa de ozono, son provocados por los gases que contribuyen a su deterioro, existe una incertidumbre significativa sobre los efectos combinados de los diversos gases en la estratosfera, ya que se estima que todos los compuestos clorados y bromados que poseen la estabilidad suficiente para llegar a dicha capa pueden tener un impacto. Los principales responsables del agotamiento de la capa de ozono son los CFC, los halones y los HCFC. Esta disminución en la capacidad de la capa de ozono para filtrar la luz ultravioleta (UV) que penetra en la atmósfera terrestre ocasiona un aumento en la cantidad de luz UVB, que puede ser cancerígena, que alcanza la superficie de la Tierra (Bongiovanni et al., 2023).





6.1.2.3 Potencial de acidificación (AP)

La liberación de protones en los ecosistemas terrestres o acuáticos tiene diversas repercusiones en estos entornos. Los compuestos de azufre (SOx) y nitrógeno (NOx), emitidos tanto por fuentes naturales como antropogénicas, regresan a la superficie terrestre bajo la forma de ácido sulfúrico y nítrico, transportados por las precipitaciones y dando origen a la lluvia ácida. Este fenómeno provoca la acidificación de ríos y lagos, lo que resulta en un aumento en la concentración de iones metálicos como aluminio, cadmio, zinc y plomo, con efectos perjudiciales para los ecosistemas. Además, las elevadas deposiciones de compuestos de azufre y nitrógeno ocasionan daños en suelos y bosques (Bongiovanni et al., 2023). Las emisiones se cuantifican en kilogramos y se expresan en equivalente de dióxido de azufre (SO₂).

$$AP = \frac{\frac{V_i}{M_i}}{\frac{V_{SO_2}}{M_{SO_2}}} m_i \quad (6.7)$$

La ecuación 6.7 para el cálculo de potencial de acidificación se encuentra descrita por las variables que representa el potencial de acidificación del componente *i*, es el potencial de acidificación del SO₂, es la unidad de masa de la sustancia *i*, es la unidad de masa del SO₂ y es la masa (kg) de un componente significativo *i* emitido (González-Delgado et al., 2022b). Teniendo en cuenta los terminos indicados anteriormente, los ecosistemas circundantes pueden ser eventualmente afectados debido a los procesos de reacción entre el vapor de agua y los gases emitidos, los cuales se combinan para formar ácidos en la atmósfera, siendo este proceso el responsable de la acidificación potencial del medio ambiente (Meramo-Hurtado et al., 2020c).

6.1.2.4 Potencial de oxidación fotoquímica (PCOP)

También conocido como Potencial de formación de Smog. Este índice se deriva de la comparación entre la velocidad de reacción de una unidad de masa de un producto químico con un radical hidroxilo (OH⁻) y la velocidad a la que una unidad de masa de etileno realiza la misma reacción. Su aplicación se centra en hidrocarburos con un peso molecular bajo o medio (Aguilar Vásquez & González-Delgado, 2021). La ecuación 6.8 describe el potencial por medio de los factores que representa el cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de un compuesto orgánico volátil *i*, se refiere a este mismo cambio, pero respecto a la emisión de etileno, es la emisión integrada de un compuesto orgánico volátil *i* hasta un tiempo *t*, se refiere a esta última

condición respecto al etileno y es la masa (kg) del compuesto orgánico volátil emitido (González-Delgado et al., 2022b).

$$PCOP = \frac{\frac{a_i}{b_i(t)}}{\frac{a_{C_2H_4}}{b_{C_2H_4}(t)}} m_i \quad (6.8)$$

La formación de ozono mediante procesos fotoquímicos surge de la descomposición de compuestos orgánicos (NO_x, VOCs) bajo la influencia directa de la luz solar. Mientras que el smog constituye un impacto a nivel local, la formación de ozono en la troposfera adquiere un alcance regional. A medida que el ozono interactúa con otros contaminantes atmosféricos, se generan una serie de sustancias capaces de causar daños considerables en las plantas, así como irritación ocular y problemas respiratorios. Este proceso de formación de ozono no sigue una dinámica lineal y está sujeto a factores meteorológicos, además de las concentraciones de fondo de NO_x y COVNM. Su incidencia suele ser más marcada durante los meses de verano y se observa principalmente en áreas urbanas con elevada exposición solar y una limitada circulación de masas de aire. La medición de su impacto se lleva a cabo utilizando la unidad de referencia de kilogramos de etileno (C₂H₄) equivalente (Bongiovanni et al., 2023).

6.1.3. Categorías toxicológicas

Las clasificaciones toxicológicas se subdividen en efectos ambientales y sobre humanos. Los efectos ambientales evalúan la concentración letal (LC₅₀) y la dosis letal oral aguda 50 (DL₅₀), esto por medio de los potenciales de toxicidad acuática y terrestre respectivamente. Con respecto a los efectos sobre humanos se evalúan el Valor Límite Umbral (TLV) y la dosis letal oral aguda 50 (DL₅₀), es decir, el potencial de toxicidad humana por ingestión y el potencial de toxicidad humana por inhalación o exposición dérmica, en el respectivo orden (Herrera et al., 2022b).

6.1.3.1 Potencial de toxicidad acuática (ATP)

El ATP, representado en la ecuación 6.9, conocido como ensayo de toxicidad aguda, es una técnica utilizada para determinar la cantidad de una sustancia que es letal para el 50% de una población de peces, en este caso específico, las carpitas cabezonas. Esta medición es crucial para evaluar el impacto de ciertas sustancias en el medio ambiente acuático y entender su peligrosidad (Herrera et al., 2023).





$$ATP = \frac{1}{LC_{50}} \quad (6.9)$$

Se seleccionó esta especie específica debido a su reconocimiento como un indicador acuático de alcance universal y a la disponibilidad de datos (Aguilar Vásquez & González-Delgado, 2021). Esta elección se basa en su capacidad para proporcionar información representativa sobre las condiciones ambientales acuáticas y los posibles efectos de diversas sustancias en los ecosistemas acuáticos. La amplia disponibilidad de datos sobre esta especie la convierte en una opción idónea para estudios y análisis en el campo de la ecología y la toxicología acuática.

6.1.3.2 Potencial de toxicidad terrestre (TTP)

Los valores de la categoría de potencial de toxicidad humana por ingestión se indican en la ecuación 6.10, y son equivalentes a los datos de ingesta letal (LD_{50} oral-rata) (Meramo-Hurtado et al., 2020b). Estos valores son idénticos, reflejando el nivel de riesgo asociado con la exposición a través de la ingesta, y son fundamentales para evaluar los posibles efectos tóxicos de sustancias químicas en la salud humana.

$$TTP = \frac{1}{LD_{50}} \quad (6.10)$$

La información se expresa como una dosis letal que causa la muerte al 50% de los individuos cuando se ingiere por vía oral. Esta determinación se realiza utilizando los datos toxicológicos obtenidos de una especie terrestre, específicamente la rata. La elección de esta especie como modelo se fundamenta en su reconocimiento como un indicador confiable para evaluar riesgos en entornos terrestres, así como en la gran cantidad de información disponible sobre ella (González-Delgado et al., 2022c). Esta abundancia de datos facilita el análisis y la interpretación de los resultados, proporcionando una base para la evaluación de la toxicidad de diversas sustancias en seres humanos y otros organismos.

6.1.3.3 Potencial de toxicidad humana por inhalación o exposición dérmica (HTPE)

El valor del umbral de toxicidad para la exposición humana (HTPE) se calcula usando la ecuación 6.11 y se establece para compuestos químicos

que se encuentran en estado gaseoso a una temperatura de 273 K y una presión de 1 atmósfera. En el caso de ciertas sustancias, se asignan valores umbrales, conocidos como TLV (Threshold Limit Value), siguiendo las recomendaciones de organismos como la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) o el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) (Herrera et al., 2023). Estos valores TLV son crucialmente importantes ya que indican los niveles de exposición considerados seguros para los trabajadores y el público en general. Son fundamentales para establecer normativas y protocolos de seguridad en entornos laborales donde estas sustancias están presentes, ayudando así a proteger la salud y el bienestar de las personas.

$$HPTE = \frac{1}{TLV} \quad (6.11)$$

Los valores límite de umbral (TLV), se expresan típicamente en mg/m³. Para calcular este índice, se emplearon promedios ponderados en el tiempo, considerando un periodo de 8 horas, que reflejan la exposición acumulada a lo largo del tiempo (Aguilar Vásquez & González-Delgado, 2021). Estos promedios temporales son cruciales para evaluar adecuadamente el riesgo asociado con la inhalación y la exposición dérmica a diversas sustancias químicas en entornos laborales y ambientales.

6.1.3.4 Potencial de toxicidad humana por ingestión (HTPI)

El HTPI, también conocido como el ensayo de toxicidad oral aguda descrito en la ecuación 6.12, constituye una herramienta fundamental en la evaluación de la seguridad de sustancias químicas y compuestos. Herrera et al. (2023) plantean que este método se utiliza para determinar la cantidad de una sustancia que resulta letal para el 50 % de un grupo de ratas cuando se administra por vía oral. La relevancia de esta medición radica en su capacidad para proporcionar datos precisos sobre la toxicidad aguda de diversos elementos, lo que contribuye significativamente a la protección de la salud pública y al cuidado del medio ambiente. En esencia, el HTPI desempeña un papel crucial en la evaluación de riesgos y en la toma de decisiones relacionadas con la regulación de productos químicos y compuestos en diferentes industrias.

$$HPTI = \frac{1}{LD_{50}} \quad (6.12)$$





Siguiendo con lo anterior, este potencial, se describe como el inverso de la dosis letal, que representa la cantidad de sustancia que ocasiona la muerte en el 50% de las ratas por vía oral de la especie química (LD_{50}). Este parámetro se mide en miligramos de producto químico por kilogramo de peso corporal de la rata (González-Delgado, Ramos-Olmos & Aguilar-Vásquez, 2023).

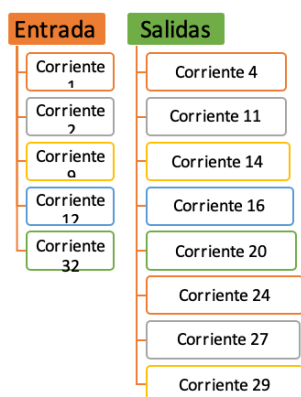
6.2 Resultados

El algoritmo de reducción de residuos (WAR) se destaca como una herramienta valiosa para evaluar el posible impacto ambiental derivado de las operaciones de una industria química. Este impacto, generalmente asociado con la energía y los recursos utilizados o liberados durante el proceso, puede tener efectos significativos en el entorno circundante. Es crucial tener en cuenta que el consumo de energía térmica del proceso alcanzó un total de 1968,993 MJ/h, lo que subraya la importancia de evaluar y mitigar los efectos ambientales adversos.

Según Herrera et al. (2022b) el algoritmo WAR se reconoce como un indicador confiable para medir y comparar la sostenibilidad ambiental de diversos procesos industriales. Su capacidad para proporcionar una evaluación detallada y precisa de los impactos ambientales potenciales lo convierte en una herramienta invaluable para identificar áreas de mejora y adoptar prácticas más sostenibles en la industria química y otros sectores relacionados.

Figura 6.1.

Corrientes del proceso que se ingresan al software WARGUI para el análisis ambiental.





Para la evaluación ambiental del proceso en la cadena lineal, se empleó un enfoque computacional asistido utilizando el algoritmo de reducción de residuos (WAR) a través del software WARGUI®. Previamente, se recopilaron los flujos de masa y las composiciones requeridas. Del balance de masa obtenido de la simulación del capítulo 3 se tomaron los valores de las corrientes de entrada y salida al proceso para ingresarlas al algoritmo (Figura 6.1). El software WAR considera los datos toxicológicos de las sustancias presentes en las corrientes del proceso, como ácidos grasos, hexano, hipoclorito de sodio, material lignocelulósico, agua, entre otros. Estos datos incluyen información como el número CAS, la fórmula química, el peso molecular, LD₅₀, LC₅₀, TWA PEL, entre otros, todos los cuales son indispensables para evaluar el impacto de cada sustancia en el proceso (González-Delgado et al., 2017). Se establecieron cuatro casos de estudio, los cuales se plantean en la Tabla 6.1: el caso 1 excluye tanto la corriente de producto como la fuente de energía utilizada en el proceso; el caso 2 considera únicamente la corriente de producto; el caso 3 incorpora la fuente de energía; y finalmente, el caso 4 tiene en cuenta tanto la corriente de producto como la fuente de energía.

Tabla 6.1.

Casos de estudio planteados en el análisis ambiental para la extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.

Casos de estudio	Suposiciones	
Caso 1	Excluyendo los impactos del producto	Excluyendo los impactos de la fuente de energía
Caso 2	Incluyendo los impactos del producto	Excluyendo los impactos de la fuente de energía
Caso 3	Excluyendo los impactos del producto	Incluyendo los impactos de la fuente de energía
Caso 4	Incluyendo los impactos del producto	Incluyendo los impactos de la fuente de energía

Los impactos ambientales potenciales generados y de salida de cada proceso se cuantifican tanto de manera global, como discriminados bajo las categorías de impacto Potencial de toxicidad humana por ingestión (HTPI), Potencial de toxicidad humana por inhalación o exposición dérmica (HTPE), potencial de agotamiento del ozono (ODP), Potencial de Calentamiento Global (GWP), Oxidación fotoquímica potencial (PCOP), Potencial de acidificación (AP), Potencial de toxicidad acuática (ATP) y Potencial de toxicidad terrestre (TTP).

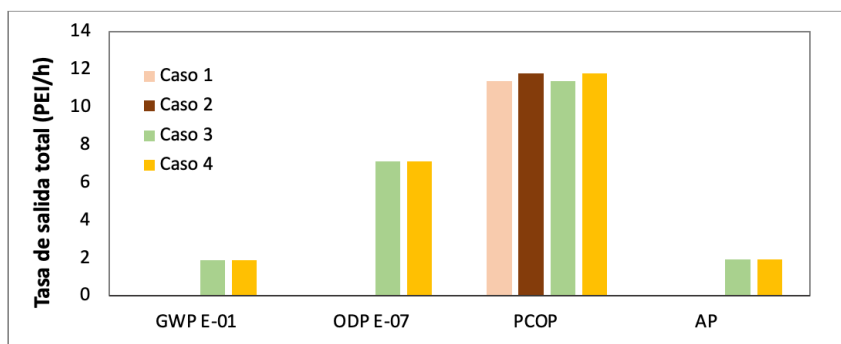


6.2.1 Impactos atmosféricos del proceso

Se realizaron evaluaciones en diversas categorías para comprender el impacto ambiental global del proceso en cuestión. La Figura 6.2 proporciona una representación detallada de los impactos atmosféricos generados por la unidad de tiempo. Dentro de esta área, se identifican resultados mayores de PEI en las categorías de potencial de agotamiento del ozono (ODP) y el potencial de oxidación fotoquímica (PCOP). La presencia de componentes orgánicos volátiles que se liberan del sistema mediante corrientes residuales, como el hexano utilizado en la etapa de extracción, está vinculada a los altos valores del PEI mostrados en el proceso para la categoría PCOP.

Figura 6.2.

Impactos atmosféricos de salida (PEI/h) del proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



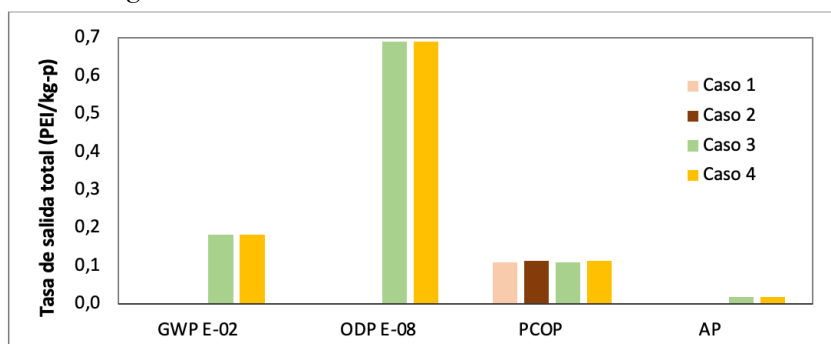
Es relevante destacar que la categoría AP muestra valores consistentes en los casos 3 y 4, tanto en los impactos generados como en los resultantes, mientras que los casos 1 y 2 muestran valores de 0 PEI/h. Esta variación se explica por la inclusión de la fuente de energía en los casos 3 y 4.

En términos generales, las categorías de impacto atmosférico global exhiben un desempeño satisfactorio. En los casos 3 y 4, el proceso muestra mínimos impactos de ODP, lo que sugiere la descomposición de productos químicos en la atmósfera. Es importante destacar que los productos químicos con ODP suelen contener átomos de cloro o bromo; en este contexto, se emplea NaClO para la limpieza de la fruta. Dichos valores consideran la descomposición de productos químicos en la atmósfera. En lo que respecta al GWP, los valores para los casos 3 y 4 son insignificantes (0,19 PEI/h para

ambos), lo que confirma la escasa contribución del proceso a las emisiones de gases de efecto invernadero. En la Figura 6.3 se observa una disminución de los impactos en la categoría de oxidación fotoquímica con valores del orden $6,91\text{E}-09$ para el caso 3 y 4 que consideran la fuente de energía.

Figura 6.3.

Impactos atmosféricos de salida (PEI/kg-p) del proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



Los resultados presentados en la Figura 6.3 revelan que la categoría con menores impactos es el potencial de acidificación (AP), la cual está asociada con la posible acidificación del medio ambiente como resultado de los procesos de reacción entre el vapor de agua y los gases emitidos, que forman ácidos en la atmósfera y posteriormente afectan a los ecosistemas (Mera-mo-Hurtado et al., 2020c). Por lo tanto, esta tasa de generación de impactos potenciales podría indicar que el proceso tiene una mínima emisión a la atmósfera. Igualmente, se evidencia una disminución en los impactos potenciales, lo que indica la alteración o descomposición de las sustancias durante los procedimientos; por tanto, este fenómeno se atribuye a la recuperación y reutilización del solvente utilizado en el proceso de extracción.

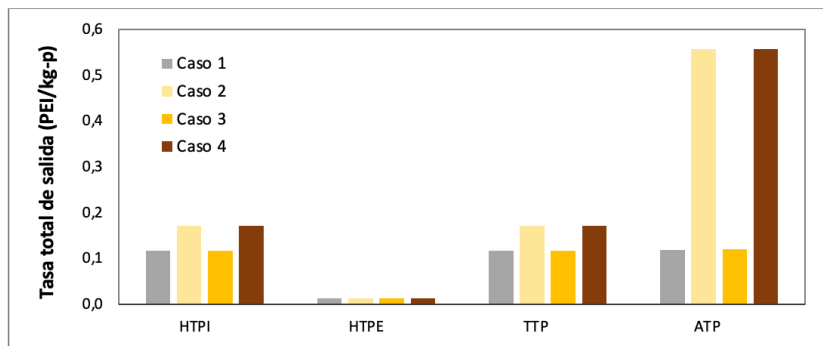
6.2.2 Impactos toxicológicos del proceso

Los efectos tóxicos generados muestran cifras inferiores a los resultados de salida; esto debido a que se abarcan categorías que examinan los impactos en humanos y en los ecosistemas, tal como se ilustra en la Figura 6.4. En los casos 2 y 4 se registran los mayores índices en la categoría de ATP, tanto para los efectos generados como para los de salida; estos resultados derivan del empleo de hexano en la extracción, ya que se volatiliza con facilidad y puede dispersarse en el aire, reaccionando con el oxígeno, en el agua que permanece en la superficie o en el suelo (Herrera et al., 2022b).



**Figura 6.4.**

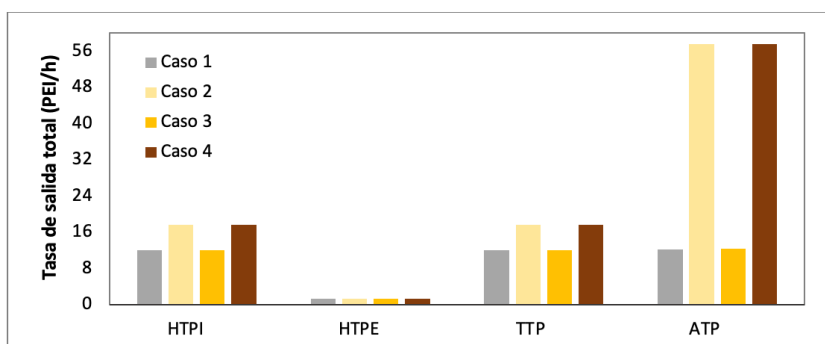
Impactos toxicológicos de salida (PEI/kg-p) del proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



Para los casos 1 y 3, los impactos generados son bajos, lo cual puede vincularse con la recirculación de los flujos en el proceso. Por otra parte, el HTPE presenta cifras inferiores a las demás categorías, tanto en la Figura 6.4 como la Figura 6.5; esta medida sirve para comparar productos químicos que plantean una amenaza para la salud humana por inhalación y exposición dérmica. Los resultados de las categorías HTPE, HTPI y TTP señalan que el proceso podría afectar a los seres humanos y al ecosistema terrestre, debido a la presencia de hipoclorito de sodio empleado en el lavado, y hexano usado como disolvente en la extracción de aceite. Adicionalmente, González-Delgado et al. (2022c) exponen que los ácidos grasos (componentes del aceite de aguacate), dada la naturaleza de su composición y el elevado punto de ebullición suelen generar impactos ambientales atmosféricos inferiores.

Figura 6.5.

Impactos toxicológicos de salida (PEI/h) del proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



6.2.3 Impactos totales del proceso

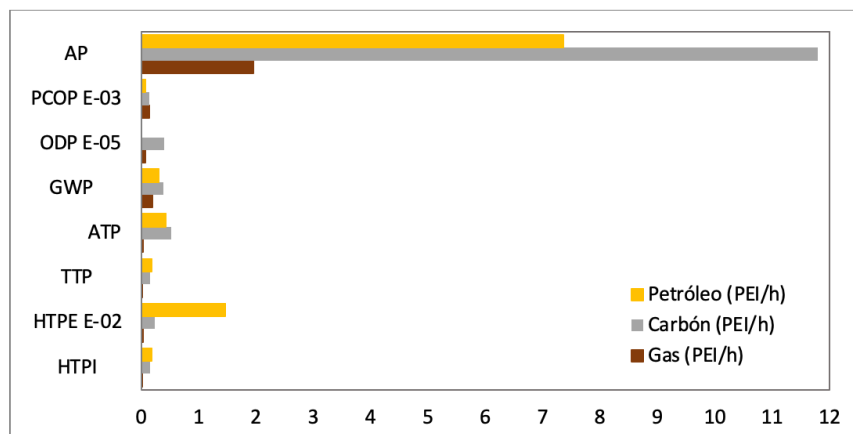
La elección de la fuente de energía en un proceso es un factor crucial que puede tener un impacto significativo en su eficiencia, costos y repercusiones ambientales. La fuente de energía utilizada determina en gran medida la cantidad de recursos naturales consumidos, las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes liberados durante la producción. Además, la selección de la fuente de energía adecuada puede influir en la viabilidad económica del proceso a largo plazo, ya que ciertas fuentes pueden ser más costosas de mantener o menos sostenibles que otras. Por lo tanto, comprender las implicaciones de cada opción de energía y elegir la más adecuada en función de las necesidades específicas del proceso es fundamental para garantizar su eficacia, rentabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

En la Figura 6.6 se visualizan tres fuentes energéticas (gas, carbón y petróleo), las cuales son objeto de evaluación para analizar su influencia en el proceso y determinar cuál sería la más idónea para satisfacer sus necesidades energéticas. Según los datos presentados en el gráfico, se observa que el gas es la fuente que genera los impactos más bajos en cada una de las categorías consideradas. Por otro lado, la categoría que registra los mayores impactos al emplear distintas fuentes de energía es la de Potencial de Acidificación (AP), siendo el carbón el combustible que produce los impactos más elevados (11,8 PEI/h). Esta situación se atribuye al hecho de que el carbón, al ser quemado, emite material particulado y otras sustancias contaminantes que contribuyen a la formación de la lluvia ácida (Barreto Coutinho et al., 2022). Es pertinente anotar que los combustibles fósiles, como el petróleo, el gas y el carbón, representan la principal causa de contaminación atmosférica. Se utilizan en grandes cantidades y los residuos de su combustión se liberan a la atmósfera en forma de polvo, humo y gases, generando impactos ambientales significativos (Méndez et al., 2023).



**Figura 6.6.**

Impactos por categorías (PEI/h) teniendo en cuenta gas, carbón y petróleo como fuentes de energía para la extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



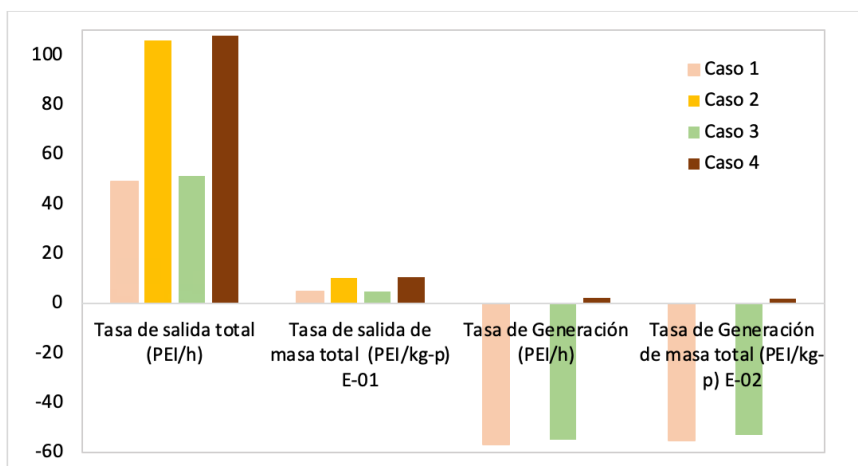
Resulta pertinente tener en cuenta el impacto de la energía utilizada en el proceso, considerando lo que los autores Gómez et al. (2019) indican, ya que exponen que los impactos ambientales potenciales de un proceso surgen debido a la energía y los materiales que adquiere o libera en el medio ambiente. Estos impactos pueden variar según diversos factores, como la cantidad y naturaleza de los recursos utilizados, así como la forma en que se gestionan los residuos y las emisiones resultantes. Es fundamental tener en cuenta estos aspectos durante la evaluación de un proceso, ya que pueden influir significativamente en su huella ambiental y en su sostenibilidad a largo plazo.

La Figura 6.7 exhibe el comportamiento de los impactos ambientales producidos y generados en la cadena lineal simulada. En los casos 1 y 3, se observan impactos generados por unidad de masa (-56,9 y -54,7 PEI/h) y por unidad de masa (-0,55 y -0,52 PEI/kg-p) negativos, lo que sugiere que los posibles impactos ambientales de las salidas son inferiores a los de las corrientes de entrada (Arteaga et al., 2018). En contraste, los casos 2 y 4 presentan impactos generados por unidad de masa ($5,65 \times 10^{-6}$ y $2,1 \times 10^{-2}$ PEI/kg-p, respectivamente) y por unidad de tiempo ($5,84 \times 10^{-5}$ y $2,17 \times 10^0$ PEI/kg-p, respectivamente) positivos. Sin embargo, los impactos de salida son positivos para todos los casos, con valores de 106 y 108 PEI/h para los casos 2 y 4, respectivamente, y de 10,3 y 10,5 PEI/kg-p para los mismos casos. En cuanto a los casos 1 y 3, los impactos de salida por unidad de tiempo se sitúan en 49,2 y 51,4 PEI/h, respectivamente, y los impactos por unidad

de masa son de 0,475 y 0,496 PEI/kg-p, respectivamente. Según Aguilar Vázquez y González-Delgado (2021), la fuente de energía incrementa los impactos más que los productos, lo cual se evidencia en el comportamiento de los casos 2 y 4.

Figura 6.7.

Impactos totales de salida y generados por unidad de tiempo y unidad de masa para el proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano.



Siguiendo con lo anterior, podemos observar en la Figura 6.7 los impactos ambientales de salida y generados del proceso por unidad de tiempo, siendo los primeros positivos y los generados representados con valores negativos, es decir, los impactos de salida son mucho mayores a los generados; lo anterior, ocurre debido a que en el proceso se obtienen corrientes que no son aprovechadas (vapor, agua, pulpa sin aceite y hexano). La generación de PEI negativa señala que los elementos presentes en los flujos de salida son menos perjudiciales que los componentes originales. Esto refleja una mejora en la calidad ambiental del proceso y sugiere una reducción en el impacto ambiental total (Meramo et al., 2022). Así mismo, los valores negativos en los impactos generados indican una disminución en los impactos potenciales, pues algunas sustancias contaminantes son recirculadas al proceso (Cassiani-Cassiani et al., 2018), en este caso para el proceso de obtención de aceite de aguacate criollo-antillano parte del hexano se recircula enviándolo a la etapa de extracción de aceite.

En su estudio sobre la viabilidad de un proceso destinado a la producción de aceite de aguacate para uso cosmético, Pérez et al. (2021a) seña-





lan que la naturaleza del disolvente plantea desafíos para su recuperación y eliminación del proceso, requiriendo instalaciones especializadas para este fin. Además, subrayan la necesidad de un alto consumo de energía, dado que la extracción debe llevarse a cabo durante extensos periodos para garantizar su eficiencia. Los hallazgos obtenidos reflejan similitudes con investigaciones anteriores, como las de Moncada et al. (2016), donde se identificaron los mayores impactos ambientales en categorías como ATP y PCOP en tecnologías de extracción que involucran solventes. Esta situación se atribuye a los efectos negativos del hexano sobre estas categorías, derivados de su toxicidad y los riesgos asociados si no se maneja adecuadamente.

Desde una perspectiva medioambiental, el proceso de obtención de aceite de aguacate emerge como una opción favorable, dado que sus efectos toxicológicos y atmosféricos son inferiores a los documentados en estudios previos. Esta evaluación proporciona una comprensión más amplia de los impactos derivados del proceso de extracción de aceite de aguacate, ofreciendo una solución para aprovechar las frutas que se deterioran en los Montes de María debido a la presencia de hongos o al daño durante el transporte, volviéndose menos atractivas para el consumo humano. Se propone la utilización de semillas y cáscaras como una medida para reducir la generación de residuos ambientales, lo que resulta en un proceso con una huella de contaminación mínima.

La metodología WAR es una herramienta valiosa para identificar y comparar los impactos ambientales potenciales de un proceso, pero presenta algunas limitaciones debido a su enfoque basado únicamente en las emisiones y flujos de masa (entradas y salidas), sin tener en cuenta el ciclo de vida completo de los productos y materia prima (extracción, transporte o disposición final). De acuerdo con lo anterior, el algoritmo WAR ofrece una perspectiva parcial que, aunque útil para identificar puntos críticos dentro de una planta o proceso específico, no sustituye a métodos más integrales como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Otro aspecto que no tiene en cuenta el WAR es el uso de fuentes de energía renovable, pues en el software solo es posible evaluar los impactos provocados por el uso de petróleo, carbón o gas, a diferencia del ACV que tiene más opciones de fuentes de energía que pueden ser incluidas en los análisis. Por estas razones, para futuras investigaciones sería conveniente evaluar el impacto ambiental total de la producción de aceite de aguacate a partir de la pulpa de

esta fruta, integrando el WAR con técnicas de evaluación ambiental más completas.

6.3 Conclusiones

El análisis ambiental no solo representa una herramienta esencial para determinar los impactos del proceso, sino que también es un paso en el conjunto de herramientas que permite garantizar la sostenibilidad de un proceso. En el contexto de una planta de producción de aceite de aguacate criollo-antillano establecida en Colombia, se consideran minuciosamente las particularidades y variaciones inherentes al proceso, tal como se detalla en el estudio. Este enfoque exhaustivo posibilita la obtención de un producto final con valor añadido, todo ello en un entorno ambiental seguro y respetuoso. Es crucial destacar que, gracias a la cuidadosa planificación y selección de métodos, se logra mantener bajos los impactos generados y el rendimiento del proceso. Esto se debe en gran medida a la minimización del uso de reactivos que pudieran ocasionar daños tanto a la salud humana como al medio ambiente. No obstante, al examinar más detenidamente la fuente de energía empleada durante el proceso y el flujo de productos, es posible vislumbrar la posibilidad de un incremento en los impactos toxicológicos, tanto aquellos generados durante la producción como los derivados del producto final.

En lo que respecta a los impactos atmosféricos resultantes de la producción de aceite de aguacate, el análisis revela que la categoría más afectada, especialmente en los casos 3 y 4, es el potencial de acidificación (AP), esto debido al uso de un compuesto volátil como lo es el hexano. Este hallazgo es particularmente significativo, dado que el caso 3 abarca el flujo del producto en sí mismo, mientras que el caso 4 incluye tanto la fuente de energía utilizada como el flujo de productos. Esta correlación evidencia la importancia de considerar de manera integral todos los elementos involucrados en el proceso para minimizar su impacto ambiental.





CAPÍTULO 7

INDICADORES ECONÓMICOS EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE

| 133



Este capítulo tiene como objetivo mostrar la viabilidad técnico-económica de la valorización del aguacate criollo antillano maduro para la extracción de aceite en el norte de Colombia. La planta utiliza como materia prima aguacates rechazados para el consumo humano, lo que reduce significativamente el costo de la materia prima. En Colombia, la cosecha y producción de aguacate han aumentado debido a la creciente demanda en los mercados internacionales y a la insuficiencia para satisfacer las necesidades internas. A pesar de la expansión de las áreas cultivadas, la producción está limitada por la falta de asistencia tecnológica adecuada y por la selección de campos apropiados para cada tipo de aguacate (Ramírez et al., 2018). Sin embargo, la región de los Montes de María se considera una región importante para el cultivo de aguacate (Marsiglia et al., 2018). No obstante, debido a la falta de técnicas adecuadas de recolección y distribución, una parte de la cosecha madura sin ser utilizada por la industria (Méndez Prada, 2016).

El aceite de aguacate puede obtenerse a partir de métodos físicos, biológicos, enzimáticos y químicos como extracción por solventes, prensado en frío, extracción por fluidos críticos, método biológico-enzimático asistido, entre otros (López et al., 2021). Por otra parte, el uso de solventes orgánicos para la extracción del aceite hace necesarias etapas de refinación que permitan cumplir con las especificaciones a nivel cosmético (Pérez et al., 2021b); por esta razón, es importante generar alternativas



de valorización y evaluar su desarrollo económico. En la literatura se presentan algunas evaluaciones económicas llevadas a cabo a procesos de producción de aceite de aguacate a partir de distintas variedades de este fruto y empleando diferentes técnicas de extracción de las cuales depende la eficiencia del proceso y los costos de procesamiento. Melo y Mora (2018), evaluaron técnica y financieramente el proceso de extracción de aceite de aguacate a partir de la variedad Lorena con el fin de usar este producto en la industria cosmética. De acuerdo con lo anterior, encontraron que al asignarle un precio de 498.760 pesos colombianos al galón de aceite obtienen una tasa interna de retorno (TIR) de 14,82% y una ganancia de 25.260.290 millones de pesos colombianos. Fawcett (2004), realizó la evaluación de la producción a gran escala aceite de aguacate usando métodos físicos, obteniendo en el análisis económico una inversión total de capital de 567.636.450 millones de pesos colombianos, un VPN de 431.409.179 pesos colombianos y una TIR del 30,23%. Ríos et al. (2018), evaluaron la producción y comercialización de aceite de aguacate para fines cosméticos en la ciudad de Bogotá, según los resultados el proceso alcanza un VPN de 72.557.416 pesos colombianos, con una relación C/B de 1,6 y un tiempo de recuperación de la inversión de 4,5 años.

Así mismo, se realizó el análisis económico para una planta piloto para el procesamiento de 97 kg de aguacate para la obtención de aceite a partir de enzimas comerciales, alcanzando un rendimiento del 95,58%, obteniendo el costo para una botella de 75 ml de aceite extra virgen de aproximadamente 13.000 pesos colombianos (Acosta, 2011). Calderón y Granda (2021) desarrollaron la evaluación técnica y económica de la producción industrial de aceite de aguacate, en el estudio económico consideraron los costos directos e indirectos, tasas de interés, entre otros. Como resultado de su estudio se obtuvo una TIR de 25 % y un VPN de \$105,825, así mismo, se determinó un punto de equilibrio para el proceso de 45,40%. En este capítulo se llevó a cabo la evaluación desde una perspectiva técnico-económica de la producción de aceite de aguacate criollo-antillano (*Laurus Persea L*) cosechado en la región de los Montes de María. Se estimó la factibilidad económica para conocer el tamaño de la planta de aceite de aguacate utilizando hexano como solvente; además, la capacidad de producción, ventas anuales, gastos de equipos, tipo de proceso, tasa de interés, materia prima, entre otros aspectos que se tuvieron en cuenta para determinar la inversión total de capital e indicadores económicos considerando las condiciones del norte colombiano.

7.1. Tipos de costos

Para desarrollar la evaluación económica de la planta extractora de aceite de aguacate, se siguió el modelo propuesto por El-Halwagi, basado en la estimación de costos y economía de procesos químicos; para lo cual se utilizaron diferentes ecuaciones para observar el comportamiento y rentabilidad del proceso (El-Halwagi, 2012).

7.1.1. Inversión de capital total (TCI)

La inversión total de capital corresponde al dinero necesario para la instalación de la planta y la compra de unidades auxiliares. De igual forma, suplir los gastos que se requieren para empezar la operación (González et al., 2022b; Peters et al., 2003). La inversión total de capital se determina mediante la suma de la inversión de capital fijo (FCI), la inversión de capital de trabajo (WCI) y los costos de arranque (SUC) tal como se muestra en la ecuación 7.1.

$$TCI = FCI + WCI + SUC \quad (7.1)$$

7.1.1.1. Inversión de capital fijo (FCI)

Se refiere al dinero necesario para la compra de equipos de procesamiento y unidades auxiliares, construcción de estructuras, la preparación de la tierra, la instalación de infraestructura y sistemas de control, entre otros. La inversión de capital fijo se divide en directa e indirecta, DFCI y IFCI, respectivamente.

Los DFCI comprende los costos que se relacionan directamente con la producción, estos pueden ser equipos para el procesamiento, manipulación y almacenamiento de materias primas o productos finales. Además, dentro de estos costos se incluye la instalación de dichos equipos, la mano de obra, construcción de cimientos y plataformas, instrumentación y control, tuberías, válvulas, instalaciones eléctricas e iluminación, instalaciones sanitarias, calefacción, instalaciones para los servicios como sistemas de eliminación de residuos, generación de vapor, agua y energía, protección contra incendios, entre otros. Por su parte, los IFCI incluyen los costos que no están directamente relacionados con la producción, dentro estos se encuentran costos por adquisición de terrenos, ingeniería y supervisión,





mejoras de patio, equipos para investigación y desarrollo, honorarios del contratista, contingencias (tormentas, inundaciones, huelgas), entre otros (González et al., 2022b; Peters et al., 2003).

7.1.1.2. Inversión de capital de trabajo (WCI)

La inversión de capital de trabajo corresponde al dinero necesario para cubrir los gastos operativos hasta la venta de la primera unidad de producto, estos incluyen los costos de almacenamiento de materias primas. Generalmente los fondos se destinan al almacenamiento de materias primas durante aproximadamente dos meses antes del inicio de la producción. Una característica relevante del WCI es su recuperabilidad al final del proyecto (El-Halwagi, 2012).

7.1.1.3. Costos de arranque (SUC)

Los costos de arranque (SUC) representan los gastos que no son frecuentes vinculados con el establecimiento de una empresa, abarcando desde honorarios de contador hasta actividades de promoción y capacitación inicial de los empleados. Estos se calculan como el 10% de la inversión de capital fijo (FCI) y se relacionan con los costos de capital de trabajo (WCI) y los costos totales de inversión (TCI) (González et al., 2022b).

7.1.2. Costos de operación (OC)

Los costos de operación se calculan teniendo en cuenta los costos de producción (DPC), Cargos fijos (FCH), Overhead (POH) y Gastos generales (GE), tal como se muestra en la ecuación 7.2.

$$OC = DPC + FCH + POH + GE \quad (7.2)$$

7.1.2.1. Costos de producción directos (DPC)

Los costos de producción directos (DPC), tienen en cuenta los gastos relacionados con la operación de la planta, que dependen de la capacidad de producción. Estos incluyen materias primas, mano de obra operativa, supervisión y trabajo de oficina, servicios industriales (agua, vapor, electricidad, refrigeración), mantenimiento preventivo y correctivo, lubricantes y productos químicos de ensayo, pruebas de control de calidad. De igual forma, gastos asociados a patentes y regalías, las cuales contemplan costos asociados con derechos de

patente, amortizados durante el período de protección legal (González et al., 2022b; Peters et al., 2003).

7.1.2.2. Cargos fijos (FCH)

Los cargos fijos (FCH) de un proceso son los gastos que se dan independientemente de la operación de la planta y de la capacidad de producción, tales como la depreciación, que es la disminución del valor de los equipos a lo largo de su vida útil y puede ahorrar dinero para la reposición de activos o recuperación de capital. Los impuestos locales, los cuales varían según la ubicación de la planta y las leyes regionales. Los seguros, dependen del tipo de proceso y el grado de protección. Por último, los intereses o rentas incluyen costos de arrendamiento o pagos de intereses sobre préstamos si la planta y los edificios son adquiridos mediante endeudamiento (González et al., 2022b; Peters et al., 2003).

7.1.2.3. Overhead (POH)

Este rubro incluye costos correspondientes a servicios médicos y hospitalarios, ingeniería general, seguridad, recreación, mantenimiento general de la planta, beneficios a empleados, laboratorios de control, embalaje, protección de la planta, conserjería y servicios similares. También contempla la distribución de utilidades, tiendas, comunicaciones, transporte interno de la planta, depósitos, y facilidades de envío y recepción (Peters et al., 2003).

7.1.2.4. Gastos generales (GE)

Los gastos generales son todos aquellos que se producen por la actividad administrativa de un proceso, incluyen salarios de administradores, secretarías y contadores, así como costos de suministros y equipos de oficina, comunicaciones externas y edificios administrativos. Dentro de los gastos generales también se encuentran los costos de distribución y mercadeo, estos cubren sueldos y gastos de las oficinas de venta, comisiones, gastos de viaje de vendedores, costos de envío y contenedores, publicidad y servicio técnico de ventas. Finalmente, los gastos de investigación y desarrollo comprenden sueldos del personal involucrado, costos de operación de maquinaria y equipos, materiales, suministros y otros gastos generales relacionados con la I+D (González et al., 2022b; Peters et al., 2003).





7.1.3. Costos fijos y operativos anualizados

Los costos fijos y operativos pueden anualizarse para efectos comparativos, teniendo en cuenta la depreciación. Para el caso de la inversión de capital fijo se obtiene una expresión anualizada como se muestra en la ecuación 7.3. Los FCI_0 y FCI_s corresponden a la inversión de capital fijo depreciable y al valor de salvamento de los FCI, respectivamente.

$$AFC = \frac{FCI_0 - FCI_s}{N} \quad (7.3)$$

$$NVOC = \frac{AOC - FCH}{m_{RM}} \quad (7.4)$$

$$TAC = AFC + AOC \quad (7.5)$$

$$DGP = \sum_t \square m_i C_i^v - TAC \quad (7.6)$$

Los costos operativos variables normalizados NVOC, representan los costos variables de un proceso por unidad de producto, estos se obtienen a partir de la ecuación 7.4, en la cual se relacionan los costos operativos variables anualizados y el flujo de materia prima en toneladas por año. Por su parte, los costos totales anualizados (TAC), incluyen los costos fijos anualizados y los costos operativos anualizados, pueden determinarse mediante la ecuación 7.5. De igual forma, se puede determinar la ganancia bruta con depreciación o DGP usando la ecuación 7.6, este hace referencia a la rentabilidad de un proceso cuando se incluye la depreciación de los activos.

7.2. Indicadores económicos

El flujo de caja acumulado (CCF) hace referencia a la relación entre las utilidades y la inversión de capital, este puede calcularse por medio de la ecuación 7.7. Por su parte, la rentabilidad después de impuestos (PAT) se determina con la ecuación 7.8, esta es una medida de las ganancias netas de los procesos.

$$CCF = \frac{\sum_t \square m_i C_i^v - AOC}{TCI} \quad (7.7)$$

$$PAT = DGP (1 - itr) \quad (7.8)$$

$$VPN = \sum_n AFC_n (1 + i)^{-n} \quad (7.9)$$

$$PBP = \frac{FCI}{PAT} \quad (7.10)$$

$$\%ROI = \frac{PAT}{TCI} \times 100 \% \quad (7.11)$$

$$ACR = NPV \left(\frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right) \quad (7.12)$$

Además, mediante la evaluación económica se obtienen indicadores como el valor presente neto (VPN), correspondiente a la suma de todas las utilidades acumuladas en los periodos de vida útil de la planta como se muestra en la ecuación 7.9. Además, es posible determinar qué tan rápido puede recuperarse la inversión de capital mediante el período de recuperación de la inversión (PBP) usando la ecuación 7.10. Por su parte, el retorno de la inversión (ROI) se calcula con la ecuación 7.11, donde se tienen en cuenta las utilidades después de impuestos (PAT) y la inversión total de capital (TCI). Por último, es posible determinar la relación costo/beneficio anual (ACR) usando la ecuación 7.12, este indicador distribuye el VPN en un periodo de tiempo, cuando el valor presente neto es negativo se habla de costo anual, pero si es positivo se habla de beneficio anual (El-Halwagi, 2011; Herrera et al., 2018).

7.3. Resultados

7.3.1. Evaluación técnico-económica del proceso de extracción de aceite de aguacate

Para el análisis económico para el proceso de aprovechamiento de la pulpa de para la producción de aceite de aguacate se consideró un tiempo de vida útil de 15 años, un costo de materia prima de 36 US\$/t (DANE, 2020) y se emplearon reactivos como hipoclorito de sodio y hexano. De acuerdo con Buelvas et al., (2012), los aceites extraídos con hexano generalmente se usan en la industria cosmética, en este estudio se asignó un precio de venta de 15 US\$/kg (Alibaba, 2021), tomando como referencia los valores reportados por los proveedores.

En la Tabla 7.1 se muestran las consideraciones para la instalación de una planta de producción de aceite de aguacate en los Montes de María para el año





2021, la cual utiliza frutos que no son aptos para el consumo humano. Se estableció una tasa impositiva del 31% (Acero & Barone, 2019) y una tasa de interés del 2,6% (The World Bank, 2021) para el año 2021. Además, se asignó un valor de contingencia del 30%, destinado a cubrir posibles huelgas, cambios de diseño, fluctuaciones de precios e inundaciones. Dado que la planta es nueva, se considerará que el proceso será una “Planta en terreno no construido”, lo cual afecta el valor del terreno. El tipo de suelo considerado será arcilla suave. De igual forma, se estableció el costo por hora del operario en 30 dólares y del supervisor, en 45 dólares, ambos con 13 salarios anuales, incluyendo la prima legal establecida en Colombia.

Tabla 7.1.

Consideraciones técnico-económicas para la planta de extracción de aceite de aguacate (*Laurus persea L*).

Consideraciones para la cadena lineal	
Capacidad de procesamiento (t/año)	10.605
Flujo de producto principal (t/año)	1.000,66
Vida útil de la planta (años)	15
Valor de salvamento	10 % de FCI depreciable
Tiempo de construcción de la planta	3 años
Tasa Impositiva (ITR)	31%
Tasa de descuento	2,6 %
Subsidios (US\$/año)	0
Tipo de proceso	Probado
Control del proceso	Digital
Tipo de proyecto	Planta en terreno no construido
Tipo de suelo	Arcilla suave
Porcentaje de contingencia (%)	30
Código de diseño de tanques	(ASME)
Especificación de diámetro de vasijas	Diámetro interno
Número de trabajadores por turno	15
Costo hora operador (US\$/h)	30

Se llevó a cabo una evaluación técnico-económica asistida por computador utilizando la metodología de análisis de sensibilidad técnico-económica desarrollada por Romero et al. (2017). Se calcularon la inversión total de capital, los potenciales económicos (EP), el flujo de caja acumulado (CCF), el tiempo de recuperación de la inversión (PBP), el retorno de la inversión (ROI), el valor presente neto (NPV) y la relación costo/be-

neficio anual. La Tabla 7.2 proporciona un reporte detallado de los rubros de inversión total para la planta de producción de aceite para el año 2021, incluyendo costos de terreno, instalación de equipos, tuberías y gastos de construcción, entre otros. Los precios de los equipos, la materia prima y los reactivos necesarios para el proceso de extracción de aceite fueron obtenidos a través de cotizaciones realizadas con proveedores (www.alibaba.com) durante la investigación.

Tabla 7.2.

Inversión total de capital para la planta de extracción de aceite de aguacate.

Rubro	Total (US\$)
Equipos comprados	1.061.500,00
Instalación de equipos comprados	212.300,00
Instrumentación y control (instalados)	84.920,00
Tubería (instalados)	212.300,00
Instalaciones eléctricas (instalados)	137.995,00
Edificios (incluidos los servicios)	424.600,00
Instalaciones de servicios	318.450,00
Total DFCI	2.452.065,00
Terrenos	106.150,00
Mejoras de patio	424.600,00
Ingeniería y supervisión	339.680,00
Gastos de construcción	360.910,00
Gastos legales	10.615,00
Honorarios del contratista	171.644,55
Contingencias	318.450,00
Total IFCI	1.891.274,55
Inversión de capital fijo (FCI)	4.343.339,55
Inversión de capital de trabajo (WCI)	2.606.003,73
Costos de arranque (SUC)	434.333,96
Inversión total de capital (TCI)	7.383.677,24

El costo de los equipos de procesamiento es la parte principal de la estimación de la inversión de capital fijo, para su cálculo se consideraron los equipos requeridos en cada etapa del proceso tales como equipos de lavado, separadores de cáscara y pulpa, filtro separador, mezcladora, secadora, centrífuga, separador flash, condensador, intercambiador de calor y equipo de extracción; además, se consideraron los gastos de embarque e instalación, que involucra los costos de mano de obra y factores directamente relacio-





nados con el montaje e instalación de los equipos adquiridos. Los equipos representan los costos más elevados en comparación con otros factores que afectan a los DFCI asociados al proceso de producción, por ejemplo, tuberías, instalaciones eléctricas, instrumentación, edificios e instalaciones de servicios que incluyen fontanería, calefacción, iluminación, ventilación y servicios similares.

En la Tabla 7.3 se detallan los costos operativos totales relacionados con la instalación de la planta de producción de aceite de aguacate para el año 2021. Estos costos incluyen mano de obra, mantenimiento, materias primas, impuestos, servicios industriales, entre otros. Se consideran los costos de producción directos (DPC), los cargos fijos (FCH), el *overhead* (POH) y los gastos generales (GE). Es decir, se incluyen tanto los gastos asociados a la operación que dependen de la capacidad de producción, como los gastos independientes de la operación o capacidad de producción, tales como impuestos, costos de servicios de seguridad, ingeniería general, transporte interno y servicios hospitalarios. Además, se consideran los gastos administrativos, de mercadeo, investigación y desarrollo, entre otros (González et al., 2022b).

Tabla 7.3.
Costos operativos para la planta de extracción de aceite de aguacate.

Rubro	Total (US\$)
Materias primas	657.156,38
Servicios Industriales	3.258.977,14
Mantenimiento y reparaciones	217.166,98
Suministros operativos	32.575,05
Mano de obra operativa	140.400,00
Supervisión directa y trabajo de oficina	21.060,00
Cargos de laboratorio	14.040,00
Patentes y regalías	173.733,58
Total DPC	4.515.109,13
Depreciación (D)	282.479,30
Rubro	Total (US\$)
Impuestos locales	130.300,19
Seguros	43.433,40
Intereses/renta	73.836,77

Rubro	Total (US\$)
Total FCH	530.049,66
Overhead (POH)	84.240,00
Gastos generales (GE)	1.282.349,70
Costos totales de operación (OC)	6.411.748,48

En la Tabla 7.4 se presentan los indicadores económicos y de rentabilidad, mostrando que la planta tiene un período de recuperación de la inversión descontado (DPBP) que se alcanza a mediados del tercer año. Este indicador proporciona una estimación más precisa del tiempo necesario para recuperar la inversión en capital fijo comparado con el PBP. Además, se presenta un valor presente neto (VPN) de 360,88 millones de dólares y una relación costo/beneficio de 29,36. En el estudio realizado por Aranguren-Pineda et al. (2018) sobre la producción y comercialización de aceite de aguacate para uso cosmético, se obtuvo un DPBP de 4,5 años y una relación costo/beneficio de 1,6. Uno de los indicadores clave que sugiere la viabilidad del proyecto es la relación C/B, que en este caso es mayor a 1, indicando que el proyecto puede ser viable económicamente. El periodo de recuperación de la inversión (PBP) es una indicación de la rapidez con la que el proyecto recupera la inversión inicial de capital fijo; mientras que el periodo de recuperación descontado (DPBP) ofrece una estimación más precisa del tiempo necesario para recuperar la inversión de capital fijo amortizable (FCI) a partir de los flujos de caja acumulados de un proyecto.

Tabla 7.4.

Indicadores económicos y de rentabilidad para el proceso de producción de aceite de aguacate.

Indicadores económicos (año 2021)	
Flujo de caja acumulado o CCF (1/año)	1,16
Período de recuperación de la inversión descontado o DPBP (años)	3,34
%ROI	77,82%
NPV (millones de dólares)	360,88
Relación Costo/Beneficio	29,36
Indicadores de rentabilidad	
Ganancia bruta o GP (US\$)	8.609.622,08
Ganancia bruta con depreciación o DGP (US\$)	8.327.142,77
Rentabilidad después de impuestos o PAT (US\$)	5.745.728,51





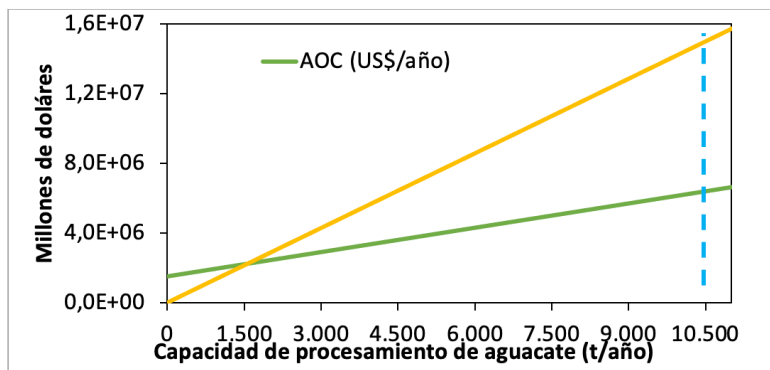
Además, el proyecto muestra un retorno de la inversión (ROI) del 77,82%. Martínez Núñez et al. (2013) evaluó la instalación de una planta de producción de aceite de aguacate en el Carmen de Bolívar, obteniendo un ROI del 43% y concluyendo que el proceso era viable. Un %ROI alto indica una mayor viabilidad en los proyectos. Por lo tanto, se puede concluir que el presente proceso puede ser económicamente rentable y atractivo para los inversores. Estudios recientes han abordado la viabilidad económica del aprovechamiento del aguacate desde distintas perspectivas. Awulachew (2024) realizó un análisis de prefactibilidad para un plan de negocio centrado en la producción de aceite de aguacate en Etiopía, destacando un valor presente neto (VPN) positivo y un índice de rentabilidad (PI) mayor a 1, lo que indica la viabilidad del proyecto. Además, el periodo de recuperación de la inversión fue de 4,44 años, considerado adecuado para minimizar riesgos financieros. Este estudio subraya que el procesamiento de aguacate representa una oportunidad empresarial no suficientemente explotada en el contexto etíope. Por otro lado, García-Maza et al. (2025) evaluaron una biorrefinería en cascada a partir de semilla de aguacate Hass en la región amazónica de Colombia, enfocándose en la producción de agentes de biocontrol, biopelículas y almidón. La inversión total estimada fue de USD 1.624.733, con un periodo de recuperación de apenas 1,39 años, un retorno de inversión del 37,58% y un VPN de 2,62 millones de USD. Asimismo, el estudio reportó una utilidad neta de USD 610.507,12 y un costo anual de producción de 1,61 millones de USD.

7.3.2. Análisis sensibilidad técnico-económica del proceso de extracción de aceite de aguacate

Con el fin de determinar el comportamiento del proceso ante posibles cambios se realizó un análisis de sensibilidad técnico-económico. Este permitió evaluar el proceso de extracción de aceite de aguacate considerando un aumento o disminución del precio de la materia prima, así mismo, con el análisis de sensibilidad es posible identificar a partir de cuánto tiempo el proceso empieza a tener ganancias. El proceso tiene una capacidad instalada de 10.605 toneladas al año de aguacate, en la Figura 7.1 se observa la capacidad de procesamiento de equilibrio para la producción de aceite de aguacate. Según la figura, el proceso tiene una capacidad de equilibrio en 1.900 t/año, correspondiente a la intersección entre las dos líneas, esto representa la flexibilidad del proceso ante cambios en su capacidad de procesamiento de aguacate, se observa que la disminución de la variable no afecta la rentabilidad de la planta.

Figura 7.1.

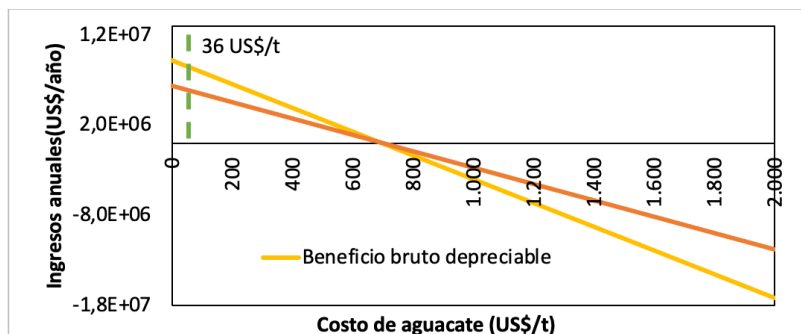
Capacidad de procesamiento de equilibrio para el proceso de extracción de aceite de aguacate.



La Figura 7.2 representa el análisis de sensibilidad del costo de la materia prima, se evidencia que el proceso alcanza un punto crítico cuando el precio del aguacate alcanza los 700 dólares por tonelada, por lo que, si este precio se duplica, el proceso podría enfrentar pérdidas. Sin embargo, dada la naturaleza del aguacate utilizado en la extracción de aceite, correspondientes a frutas que se descartan debido a que no son atractivas para consumo humano, es poco probable que su precio experimente un aumento significativo. Por lo tanto, se deduce que el proceso de extracción de aceite de aguacate podría mantener su rentabilidad, incluso ante cambios en el precio de la materia prima. Cabe destacar que el costo del aguacate (36 US\$/t) se encuentra bastante alejado de la intersección, lo que permite que el proceso tenga un margen amplio de maniobra.

Figura 7.2.

Análisis de sensibilidad del costo del aguacate con respecto a los ingresos anuales.

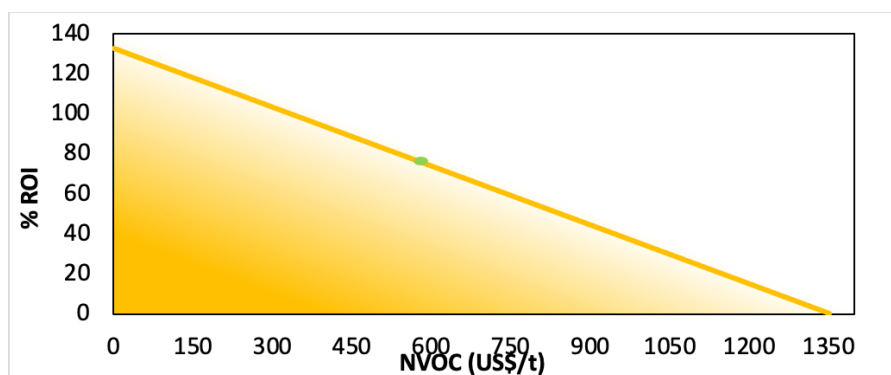




La Figura 7.3 presenta una relación entre el Retorno de la Inversión y los costos operativos variables normalizados (NVOC) en el proceso de obtención de aceite. Según la gráfica, los NVOC del proceso son de 560,16 US\$/t, mientras que el valor crítico de los costos variables se observa en 1.352 US\$/t. Dado que este punto crítico está considerablemente alejado de los NVOC de la planta, se considera que el proceso está preparado para enfrentar cambios en los costos operativos. Además, el análisis muestra que el proceso alcanza un retorno máximo de inversión de aproximadamente del 132,68 % cuando se supone que los costos variables son cero. Esto indica que puede adaptarse a fluctuaciones en los costos y maximizar el retorno de la inversión, incluso en condiciones cambiantes del mercado.

Figura 7.3.

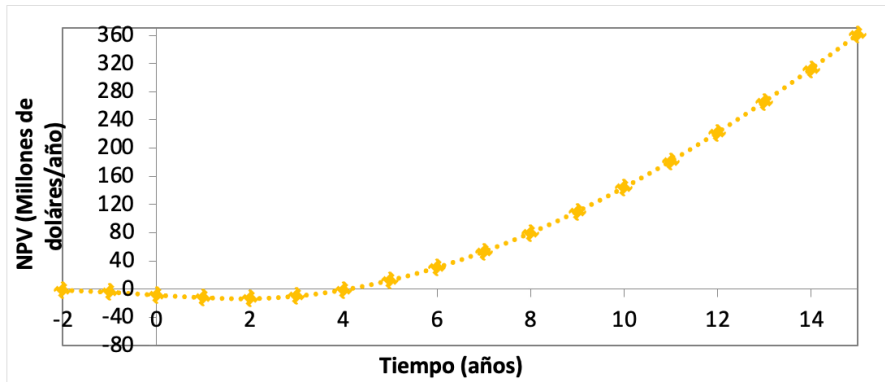
Efecto del Retorno de la Inversión (ROI) sobre los costos operativos variables normalizados (NVOC).



La evaluación del Valor Presente Neto (VPN) de la planta de extracción de aceite de aguacate permite analizar su desempeño a lo largo del tiempo, como se muestra en la Figura 7.4. Se observa que el VPN se vuelve positivo a partir del cuarto año, indicando que la inversión comienza a ser recuperada después de este período. Además, se destaca que después de cubrir los gastos del proceso, los ingresos del proyecto generan un VPN de 360,88 millones de dólares actuales. La cifra indica que el proyecto es rentable, ya que los beneficios superan tanto la inversión inicial como los costos asociados. Esto sugiere que la planta de extracción de aceite de aguacate tiene el potencial de generar retornos financieros significativos a lo largo de su vida útil, lo que respalda su viabilidad económica a largo plazo.

Figura 7.4.

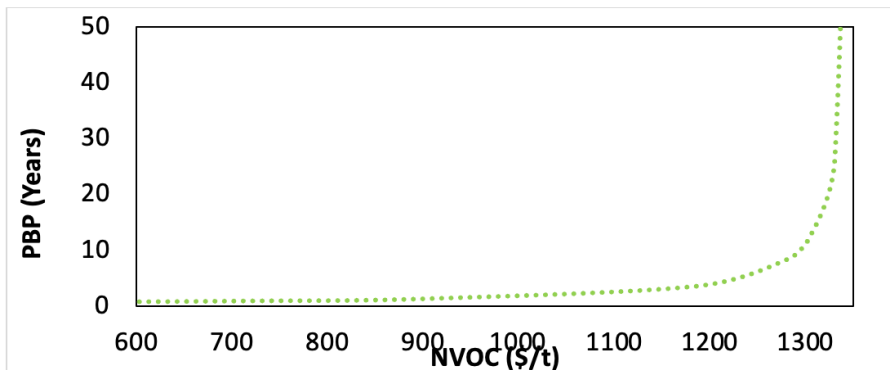
Valor presente neto para el proceso de extracción de aceite de aguacate.



En la Figura 7.5 se observa el efecto de los costos operativos (NVOC) en el período de recuperación de la inversión (PBP). Se muestra que cuando los NVOC igualan el precio de venta del aceite de aguacate, el beneficio bruto antes de impuestos se reduce a cero y el PBP tiende a infinito. Además, se puede identificar una región de estabilidad de los costos operativos hasta alcanzar los 1.000 US\$/t, pero a partir de los 1.200 US\$/t de aguacate, el PBP aumenta, indicando una pérdida de control en el proceso. Es importante destacar que, al trabajar con materias primas sujetas a fluctuaciones de precios, es inevitable que los procesos exhiben una alta sensibilidad a estos cambios.

Figura 7.5.

Período de recuperación de la inversión (PBP) teniendo en cuenta costos operativos variables normalizados (NVOC) para el proceso de extracción de aceites de aguacate.

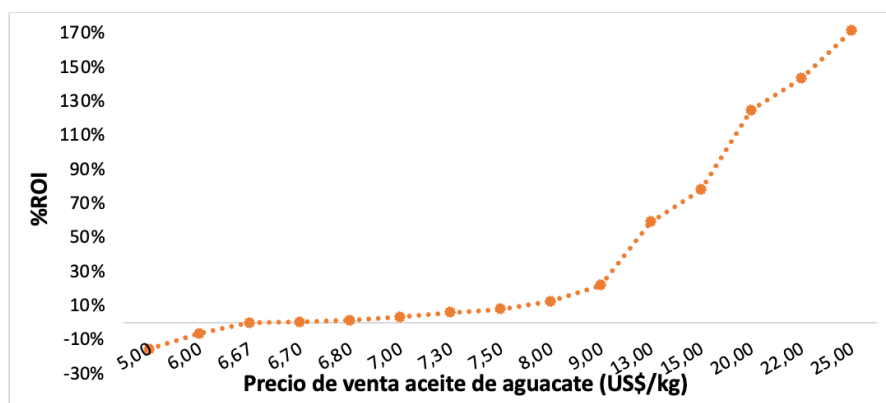




En la Figura 7.6 se muestra el comportamiento del retorno de la inversión con respecto a los cambios en el precio de venta de aceite de aguacate. Si se considera un precio de venta menor a 15 US\$/kg, hace que el proceso sea poco atractivo para su montaje y puesta en marcha, debido a que se empiezan a tener un retorno negativo, lo que indica que el proceso a partir de ese valor tiene pérdidas debido a que los ingresos generados son menores a la inversión inicial. Además, se observa que existe una relación proporcional entre el %ROI y precio de venta del producto. Se empiezan a tener valores del retorno de la inversión negativos (-0,027%) cuando el precio del aceite de aguacate es menor que 6,7 US\$/kg.

Figura 7.6.

Efecto del precio de venta del aceite de aguacate en %ROI.



7.4. Conclusiones

Considerando una capacidad de transformación de 10.500 t/año y una producción de flujo principal de 1.000,66 t/año; este estudio constató que el coste de los equipos es crítico en el cálculo de la Inversión Directa en Capital Fijo. El proceso es viable desde el punto de vista técnico y económico, ya que es posible explotar la planta cerca de su capacidad máxima. La Inversión de Capital Total (ICT) se determinó próxima a 6.433.363 USD y el proceso recupera la inversión inicial en unos 6 años, con un VAN positivo calculado en 74,00 USD. Además, los indicadores económicos ayudan a identificar la rentabilidad del proceso, en este estudio se encontró un retorno favorable de la inversión del 52,84 % y una amplia relación costo-beneficio. La planta de extracción de aceite de aguacate criollo antillano contribuirá a la recuperación del fruto y evitará que aquellas unidades

maduras se conviertan en desechos. Se recomienda evaluar un análisis de sensibilidad que estudie el comportamiento del proceso ante la variación de los precios de la materia prima.

Los análisis realizados económico, ambiental, de seguridad y exergético, permiten identificar la sostenibilidad del proceso de obtención de aceite a partir de la pulpa de aguacate. Con el análisis ambiental es posible conocer los impactos ambientales asociados al uso de sustancias químicas, el análisis económico evalúa el proceso teniendo en cuenta la inversión total de capital y los cambios que este podría tener si los costos de materia prima y/o equipo varían a lo largo de la vida útil del proyecto. Por su parte, el análisis de exergía permite identificar dónde se puede aprovechar la energía y de esta manera reducir costos de calentamiento y enfriamiento. Por último, el análisis de seguridad ayuda a evaluar la contribución de las sustancias que se emplean en el proceso determinando su nivel de peligrosidad, con el fin de realizar mejoras con respecto al uso de sustancias con propiedades fisicoquímicas más amigables o de mejorar la configuración de equipos propuesta.

A partir de los resultados se proponen recomendaciones orientadas a facilitar la implementación del proceso de valorización del aguacate en la región de los Montes de María. En primer lugar, se recomienda desarrollar centros de acopio y transformación a pequeña escala cerca de las zonas productoras, con tecnologías apropiadas que no requieran condiciones altamente especializadas, permitiendo el procesamiento inmediato de frutos descartados por calidad comercial pero aún aprovechables. Esto mitigaría las pérdidas asociadas a hongos y descomposición por malas prácticas poscosecha. En segundo lugar, se sugiere fomentar alianzas entre asociaciones campesinas, cooperativas y entidades gubernamentales, que permitan compartir costos, garantizar la trazabilidad del producto y fortalecer las capacidades técnicas locales. La capacitación en buenas prácticas de manejo poscosecha, control de humedad, y protocolos de higiene industrial es fundamental para asegurar la calidad del aceite y otros subproductos. Finalmente, se recomienda integrar este modelo dentro de estrategias regionales de bioeconomía territorial, priorizando la generación de empleo y la sustitución de tecnologías contaminantes. Esta aproximación puede contribuir no solo a mejorar la sostenibilidad productiva, sino también a promover la estabilidad económica en una zona históricamente afectada por la violencia y el abandono institucional.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN



150 |

EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE: SEGURIDAD, SOSTENIBILIDAD E INGENIERÍA COMPUTACIONAL

La investigación realizada permitió abordar de manera integral el diseño y evaluación de una planta para la extracción de aceite a partir del aguacate criollo-antillano, cultivado en la región de los Montes de María, en el norte de Colombia. A través del estudio de diversos aspectos como la técnica utilizada, el desempeño económico, los impactos ambientales, la seguridad operativa y la eficiencia energética, fue posible identificar las fortalezas del proceso y las oportunidades para su mejora dentro de un modelo de producción más sostenible y territorialmente pertinente.

Se exploraron distintas tecnologías de extracción utilizadas comúnmente en la industria de aceites vegetales, entre ellas la extracción mediante solventes, el prensado en frío, la centrifugación, así como métodos más recientes como la extracción supercrítica, la tecnología de membranas y la asistencia por ultrasonido. Cada una de estas técnicas presenta ventajas específicas en cuanto a rendimiento, eficiencia energética, pureza del producto y reducción de impactos ambientales. Para el estudio se seleccionó el método de extracción con hexano, dada su capacidad de ofrecer un alto porcentaje de recuperación del aceite, alcanzando un rendimiento del 65,19 %, lo cual es coherente con los valores reportados en la literatura para este tipo de proceso.

La simulación computacional del sistema de producción permitió visualizar su comportamiento dinámico y estimar con precisión la conversión anual de más de 10.600 toneladas de fruta en poco más de 1.000 toneladas de aceite. Además, se analizaron las propiedades de los compuestos grasos obtenidos, tales como su densidad y viscosidad, encontrando resultados compatibles con los requisitos de calidad exigidos por diferentes sectores industriales como el alimentario, cosmético y farmacéutico. La modelación del proceso también contribuyó a optimizar el diseño de la planta, evaluando distintos escenarios de operación para escoger configuraciones que maximizan el rendimiento económico, reducen el impacto ambiental y mejoran la eficiencia energética.

Desde el punto de vista financiero, se demostró que la inversión necesaria para la construcción y operación de la planta, estimada en alrededor de 6,43 millones de dólares, puede ser recuperada en un plazo de seis años,

con una rentabilidad del 52,84 % y un valor presente neto positivo. Estos indicadores reflejan una buena perspectiva para inversionistas o entidades que deseen fomentar este tipo de emprendimientos agroindustriales. Aunque las cifras no sean deslumbrantes desde un enfoque exclusivamente financiero, adquieren mayor relevancia al considerar los beneficios sociales y ecológicos que puede generar este modelo productivo, en especial en regiones donde el desarrollo económico ha sido históricamente limitado.

En cuanto a los aspectos ambientales, el proceso muestra impactos ligados principalmente al uso de hexano como solvente y al consumo energético durante las etapas térmicas. Aunque se adoptaron medidas para reducir el uso de sustancias peligrosas, persisten riesgos ambientales y toxicológicos asociados al manejo de compuestos volátiles. Esto se refleja en los resultados del análisis de ciclo de vida, que indican un aumento en el potencial de acidificación atmosférica en ciertas etapas del proceso, especialmente cuando se incluye el análisis del producto final y la fuente de energía utilizada. Tales resultados reafirman la necesidad de repensar el uso de ciertos insumos y de buscar alternativas que disminuyan la huella ambiental sin comprometer la productividad. Por otro lado, los subproductos generados durante la extracción, como las semillas y cáscaras, pueden ser utilizados como materia prima en otros procesos industriales. Estos residuos son ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina, lo cual los convierte en excelentes candidatos para la producción de materiales compostables, energía renovable, o productos de base biológica, contribuyendo a una economía más circular y menos dependiente de recursos fósiles.

Respecto a la seguridad del proceso, el estudio arrojó que la planta diseñada presenta características que la ubican dentro del rango de operaciones seguras desde la perspectiva de seguridad inherente, al obtener un índice global inferior al nivel crítico establecido. No obstante, se identificaron algunos desequilibrios en los subíndices relacionados con la inflamabilidad de los solventes empleados y con la resistencia de los materiales utilizados en los equipos. Aunque las condiciones operativas de temperatura y presión no representan amenazas mayores, se subraya la importancia de seleccionar adecuadamente los materiales de construcción, de incluir sistemas de protección ante fugas, y de capacitar al personal en el manejo de sustancias inflamables para reducir los riesgos operativos. El análisis exergético del proceso evidenció que una parte importante de la energía útil se pierde, sobre todo en etapas como la destilación, la condensación y el enfriamiento. También se identificaron pérdidas significativas





durante la centrifugación y el lavado de residuos vegetales. Estas pérdidas reducen la eficiencia energética general del sistema, la cual fue calculada en un 30,69 %, indicando un margen considerable de mejora. La implementación de estrategias de integración térmica, como redes de intercambio de calor o recuperación de calor residual, podría reducir notablemente el consumo de energía externa, al tiempo que reforzaría la viabilidad económica y disminuiría los impactos ambientales.

A partir del análisis conjunto de todas estas dimensiones, se concluye que el proceso de extracción de aceite de aguacate criollo-antillano resulta viable no solo desde el punto de vista técnico y financiero, sino que, además, ofrece múltiples oportunidades de mejora para avanzar hacia una producción más sostenible. Esta evaluación sistémica evidencia que la sostenibilidad del proceso no puede ser entendida únicamente por su eficiencia económica, sino que debe incluir el análisis de los impactos ambientales, la seguridad operativa y el uso racional de la energía.

Con el fin de facilitar una implementación exitosa del modelo propuesto en la región de los Montes de María y otras zonas productoras de aguacate, se plantea un conjunto de recomendaciones derivadas de los hallazgos obtenidos. En primer lugar, se sugiere establecer unidades de procesamiento a escala local en las cercanías de las zonas de cultivo, con tecnologías que no requieran condiciones técnicas avanzadas. Esto permitiría aprovechar de inmediato los frutos que son descartados por criterios comerciales, pero que mantienen sus propiedades para la extracción de aceite, evitando así pérdidas poscosecha provocadas por deterioro, hongos o transporte inadecuado.

En segundo lugar, se resalta la importancia de generar redes colaborativas entre campesinos, cooperativas, organizaciones comunitarias, universidades y entidades estatales. La colaboración interinstitucional es clave para asegurar la trazabilidad del producto, reducir costos, fortalecer capacidades técnicas y construir una base social sólida que respalde la sostenibilidad del proyecto. También se requiere la implementación de programas de capacitación en temas como el manejo higiénico de alimentos, la conservación de humedad en los frutos, y los protocolos de seguridad industrial. Otra recomendación importante es el aprovechamiento de los residuos generados por el proceso. En lugar de desechar cáscaras y semillas, se debe fomentar su transformación en insumos para otras industrias. Esta práctica no solo reduce el impacto ambiental de la planta, sino que

abre nuevas posibilidades de negocio, incrementando la resiliencia financiera del modelo.

Asimismo, aunque el hexano es actualmente una opción técnica eficiente, es importante avanzar hacia métodos de extracción más limpios y seguros. Tecnologías como la extracción con dióxido de carbono supercrítico o la extracción por ultrasonido, si bien implican una mayor inversión inicial, pueden reducir considerablemente los riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Mientras se da esa transición, es fundamental mantener sistemas de control y recuperación de solventes que limiten las emisiones y garanticen el cumplimiento de las normas ambientales. Este modelo de producción debería alinearse con las políticas de bioeconomía del país, priorizando el uso responsable de los recursos naturales, la generación de empleo en el campo y la transición hacia una industria más limpia. La implementación de procesos como el propuesto no solo impulsa la sostenibilidad del sector agroindustrial, sino que también puede ser una herramienta poderosa para el desarrollo económico y social de comunidades vulnerables, históricamente afectadas por la pobreza y el conflicto armado.

A modo de cierre, es importante destacar que el modelo aquí evaluado tiene el potencial de convertirse en un referente replicable en otras regiones con vocación agrícola. Su implementación puede demostrar cómo, a través de la ciencia, la ingeniería y el trabajo articulado entre diversos actores, es posible generar soluciones que no solo sean económicamente viables, sino que también contribuyan a la equidad social, al cuidado ambiental y al bienestar de las comunidades rurales. La sostenibilidad de este proceso, por tanto, no radica únicamente en su rentabilidad, sino en su capacidad de integrarse armónicamente con el territorio, respetando sus ritmos, aprovechando sus saberes y fortaleciendo su tejido social.



EPÍLOGO



154 |

EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE: SEGURIDAD, SOSTENIBILIDAD E INGENIERÍA COMPUTACIONAL

Este libro es más que un estudio técnico; es un reflejo del compromiso con una visión de desarrollo que nace desde lo local y se proyecta hacia lo global. A través del análisis riguroso de un proceso aparentemente simple como la extracción de aceite de aguacate, se revela una realidad más profunda: la posibilidad de transformar una problemática estructural en una oportunidad de cambio.

Los Montes de María, una región históricamente marginada y afectada por múltiples desafíos, tienen en su tierra y en sus frutos una respuesta a muchos de sus problemas. Este trabajo demuestra que, con conocimiento, voluntad y enfoque sistémico, es posible crear soluciones que respeten el entorno, generen valor económico y fortalezcan la identidad territorial.

Cada capítulo de este libro es un eslabón en la cadena de una propuesta que no solo busca eficiencia, sino justicia social y sostenibilidad. La recuperación de frutos descartados, la generación de empleo, la reducción de impactos ambientales y la valorización de residuos son parte de una nueva narrativa agroindustrial que incluye a las comunidades, sus saberes y sus necesidades.

El camino hacia una agroindustria más limpia, justa y resiliente está apenas comenzando. Este libro es un punto de partida para nuevas investigaciones, alianzas y emprendimientos que, con base en la ciencia y la tecnología, sigan construyendo un futuro más verde y equitativo para Colombia y otras regiones con desafíos similares.

A quienes lo lean, les dejo una invitación: que cada dato, análisis y recomendación aquí expuesta se convierta en una herramienta para actuar, innovar y transformar. Porque detrás de cada fruto desperdiciado hay una historia que puede reescribirse.

REFERENCIAS

- Abaide, E. R., Zabot, G. L., Tres, M. V., Martins, R. F., Fagundez, J. L., Nunes, L. F., Druzian, S., Soares, J. F., Prá, V. D., Silva, J. R., Kuhn, R. C., & Mazutti, M. A. (2017). Yield, composition, and antioxidant activity of avocado pulp oil extracted by pressurized fluids. *Food and Bioprocess Processing*, 102, 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.01.008>
- Acero, M. & Barone, V. (2019). *Impuesto sobre la renta*. Philippi Prietocarrizosa Ferrero DU & Uría. <https://www.ppulegal.com/insights/prensa/ii-impuesto-de-renta-para-personas-juridicas>
- Acosta, M. (2011). *Evaluación y escalamiento del proceso de extracción de aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7633>
- Aguilar Vásquez, E. & González-Delgado, Á. (2021). Evaluación ambiental de la producción de microperlas de quitosano modificadas con TiO y magnetita usando el algoritmo de reducción de residuos (WAR). *Revista ION*, 34(1). <https://doi.org/10.18273/revion.v34n1-2021010>
- Akpambang, V. O. E. (2020). Physicochemical and trace metals characterization of edible vegetable oils. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 21(7), 29–40. [10.9734/irjpac/2020/v21i730178](https://doi.org/10.9734/irjpac/2020/v21i730178)
- Alibaba. (2021). *Pure Natural Avocado Oil*. https://www.alibaba.com/product-detail/OEM-ODM-Pure-Natural-Avocado-Oil_62001046392.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.38703f3fP3z3n5
- Aranguren-Pineda, R., Gutiérrez-Castañeda, U., Orjuela-Barragán, J. & Ríos-Puentes, J. (2018). *Producción y comercialización de aceite de aguacate para uso cosmético en la ciudad de Bogotá D.C.* (Tesis de posgrado, Universidad Católica de Colombia). Repositorio Institucional <https://hdl.handle.net/10983/22531>
- Ariza, J., López, F., Coyotl, J., Ramos, M., Díaz, J. & Martínez, A. (2011).





Effect of different extraction methods on the fatty acid profile in the avocado (*Persea americana* Mill. var. Hass) oil. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2(2), 263–276.

Aslam, F., Iqbal, S., Bushra, T., Imran, M., Rebezov, M., Chumakov, V., Kenijz, N. & Shariati, M. A. (2021). Physicochemical properties of chemically interesterified vegetable oils. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 10(5), e4291. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.4291>

Aspen Technology, Inc. (2020). *Aspen Plus® User Guide* (Version 11). <https://www.aspentech.com>

Awulachew, M. T. (2024). Feasibility study of a business plan: Oil production from avocado. *Journal of Marketing & Social Research*, 1(1), 1–6.

Ayres, R. U., Ayres, L. W. & Martinast, K. (1996). *Eco-thermodynamics: Exergy and life cycle analysis* (Working Paper No. 96/04/EPS/NR). INSEAD. https://flora.insead.edu/fichiersti_wp/insead-wp1996/96-04.pdf

Aziz, A. S., Tajuddin, M. F. N., Zidane, T. E. K., Su, C., Alrubaie, A. J. K. & Alwazzan, M. J. (2022). Techno-economic and environmental evaluation of PV/diesel/battery hybrid energy system using improved dispatch strategy. *Energy Reports*, 8, 6794–6814. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.021>

Baig, A., Zubair, M., Sumrra, S. H., Nazar, M. F., Zafar, M. N., Jabeen, K., Hassan, M. & Rashid, U. (2022). Heating effect on quality characteristics of mixed canola cooking oils. *BMC Chemistry*, 16(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s13065-022-00796-z>

Barreto Coutinho, I. B., Borges Quezadas, M. B., Gomes de Souza, L. F. G., Nitz, M. & Andreola, K. (2022). Spray drying of avocado pulp using the seed as an adjuvant. *Powder Technology*, 408, 117738. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117738>

Bayramoglu, B., Sahin, S. & Sumnu, G. (2008). Solvent-free microwave extraction of essential oil from oregano. *Journal of Food Engineering*, 88, 535–540.



- Bergh, B. O. & Ellstrand, N. C. (1986). Taxonomy of the avocado. *California Avocado Society Yearbook*, 70, 135–146. http://avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_70_1986/CAS_1986_PG_135-145.pdf
- Bertel-Pérez, F., Cogollo-Cárcamo, G. & González-Delgado, Á. D. (2023). Assessing exergy efficiency in computer-aided modeled large-scale production of chitosan microbeads modified with thiourea and magnetite nanoparticles. *Sustainability*, 15(19), 14443. <https://doi.org/10.3390/su151914443>
- Bisht, A., Sahu, S. C., Kumar, A., Maqsood, S., Barwante, M. M. & Jaiswal, S. G. (2025). Recent advances in conventional and innovative extraction techniques for recovery of high-added value compounds for food additives and nutraceuticals. *Food Physics*, 2, 100047. <https://doi.org/10.1016/j.foodphy.2024.100047>
- Bongiovanni, R. G., Tuninetti, L., Charlón, V. & Minaglia, M. (2023). Análisis de ciclo de vida de la carne bovina de exportación de Argentina. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 31(1), 69–91. <https://doi.org/10.53588/alpa.310106>
- Bora, P., Narain, N., Rocha, R. & Queiroz, M. (2001). Characterization of the oils from the pulp and seeds of avocado (cultivar: Fuerte) fruits. *Grasas y Aceites*, 52, 171–174.
- Brachet, A., Rudaz, S., Mateus, L., Christen, P. & Veuthey, J. (2001). Optimisation of accelerated solvent extraction of cocaine and benzoylecgonine from coca leaves. *Journal of Separation Science*, 24, 865–873.
- Bressani, R. (2009). *Informe final: La composición química, capacidad antioxidativa y valor nutritivo de la semilla de variedades de aguacate*. Proyecto FODECYT No. 02-2006, Universidad del Valle de Guatemala. https://biblioteca.senacyt.gob.gt/library/images/1/1b/Fodecyt_2006.02.pdf
- Buelvas, G., Patiño, J. & Cano Salazar, J. (2012). *Evaluación del proceso de extracción de aceite de aguacate Hass (Persea americana Mill) utilizando tratamiento enzimático*. <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/967>



Burbano-Figueroa, O. (2019). West Indian avocado agroforestry systems in Montes de María (Colombia): A conceptual model of the production system. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 25(2). <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2018.09.018>

Cabezas, C., Hernández, B. & Vargas, M. (2016). Aceites y grasas: Efectos en la salud y regulación mundial. *Revista de la Facultad de Medicina*, 64(4), 761–768. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v64n4.53684>

Calderón Guzmán, E. C. & Granda Taípe, M. A. (2021). *Proyecto de investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingenieros Industriales*. Universidad Técnica de Cotopaxi. <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/8352/1/PI-001915.pdf>

Cassiani-Cassiani, D., Meza-González, D. A. & González-Delgado, A. D. (2018). Environmental evaluation of agar production from macroalgae *Gracilaria* sp. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 199–204. <https://doi.org/10.3303/cet1870335>

Castillo, A., Benigno, L., Penedo, M. & Sanchez, A. (2013). Simulation of the production process of biodiesel from *Jatropha curcas* oil. *Tecnología Química*, 33(2), 107–120.

Cavalcanti, E. J., Ferreira, J. V. M. & Carvalho, M. (2021). On the consideration of different dead states in the exergy assessment of a solar-assisted combined cooling, heat and power system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101361. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101361>

Ceballos Aguirre, G., Martínez Caballero, L. N., Ángel García, C. Á., Murcia Riaño, N. Martínez, M. F. & Jaramillo Laverde, A. (2023). *Reconocimiento de las principales limitantes fitosanitarias que afectan la calidad comercial del aguacate Hass*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7406726>

Ceballos, A. M. & Montoya, S. (2013). Evaluación química de la fibra en semilla, pulpa y cáscara de tres variedades de aguacate. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11, 103–112. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/270>



- Cedeño, F., Prieto, M., Bada, J. & Suárez, R. (1999). Estudio de la densidad y de la viscosidad de algunos ácidos grasos puros. *Grasas y Aceites*, 50, 359–368.
- Cervantes, B. & Yahia, E. (2021). Avocado oil: Production and market demand, bioactive components, implications in health, and tendencies and potential uses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 4120–4158. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12784>
- Chemat, F., Zill-e-Huma, & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18, 813–835.
- Chen, F., Chen, T., Wu, Z., Kong, X., Meng, X., Han, X., Lu, L., Zheng, Y. & Ouyang, M. (2024). Optimizing lithium-ion battery electrode manufacturing: Advances and prospects in process simulation. *Journal of Power Sources*, 610, 234717. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234717>
- Chen, L., Song, D., Tian, Y., Ding, L., Yu, A., & Zhang, H. (2008). Application of online microwave sample-preparation techniques. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 27(2), 151–159. DOI:10.1016/j.trac.2008.01.003
- Cheng, Y., Xue, F., Yu, S., Du, S. & Yang, Y. (2021). Subcritical water extraction of natural products. *Molecules*, 26(13), 4004. <https://doi.org/10.3390/molecules26134004>
- Cho, H. H., Strezov, V. & Evans, T. J. (2023). A review on global warming potential, challenges and opportunities of renewable hydrogen production technologies. *Sustainable Materials and Technologies*, 35, e00567. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00567>
- Chong, C. (2004). Corrosion of mild steel by palm fatty acid distillates (PFAD). *PALMAS*, 25, 408–417.
- Cintas, P., Gaudino, E. C. & Cravotto, G. (2013). Pharmaceutical and nutraceutical compounds from natural matrices. In F. Chemat & G. Cravotto (Eds.), *Microwave-assisted extraction for bioactive compounds* (Vol. 4, pp. 181–206). Springer.



- Cravotto, C., Fabiano-Tixier, A. S., Claux, O., Abert-Vian, M., Tabasso, S., Cravotto, G. & Chemat, F. (2022). Towards substitution of hexane as extraction solvent of food products and ingredients with no regrets. *Foods*, 11(21), 3412. <https://doi.org/10.3390/foods11213412>
- Crawley, F. & Tyler, B. (2015). *HAZOP: Guide to best practice: Guidelines to best practice for the process and chemical industries* (3rd ed.). Elsevier. <https://hsseworld.com/wp-content/uploads/2021/01/HAZOP-GUIDE-TO-BEST-PRACTICE-ICHEME-THIRD-EDITION.pdf>
- Dai, Y., van Spronsen, J., Witkamp, G.-J., Verpoorte, R. & Choi, Y. H. (2013). Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Analytica Chimica Acta*, 766, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.12.019>
- DANE. (2020). *Boletín semanal precios mayoristas*. Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario, 450. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Sem_13jul_2019_19jul_2019.pdf
- Danlami, J. M., Arsad, A., Ahmad Zaini, M. A. & Sulaiman, H. (2014). A comparative study of various oil extraction techniques from plants. *Reviews in Chemical Engineering*, 30(6), 605–626. <https://doi.org/10.1515/revce-2013-0038>
- Dávila, J., Rosenberg, M., Castro, E. & Cardona, C. (2017). A model biorefinery for avocado (*Persea americana* Mill.) processing. *Bioresource Technology*, 243, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.063>
- De Dios Ávila, N., Tirado-Gallegos, J. M., Ríos-Velasco, C., Esquivel, G. L., Virgen, M. O. E. & Campos, O. J. C. (2023). Propiedades composicionales, estructurales y fisicoquímicas de las semillas de aguacate y sus potenciales usos agroindustriales. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(1). https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:2607
- Demirbas, A. (2000). A direct route to the calculation of heating values of liquid fuels using density and viscosity measurements. *Energy Conversion and Management*, 41(15), 1609–1614.



- Díaz-Suárez, P., Rosales-Quintero, A., Fernandez-Lafuente, R., Pola-Sánchez, E., Hernández-Cruz, M. C., Ovando-Chacón, S. L., ... & Tacias-Pascacio, V. G. (2021). Aqueous enzymatic extraction of *Ricinus communis* seeds oil using Viscozyme L. *Industrial Crops and Products*, 170, 113811.
- Dickey, L. C., Kurantz, M. J. & Parris, N. (2008). Oil separation from wet-milled corn germ dispersions by aqueous oil extraction and aqueous enzymatic oil extraction. *Industrial Crops and Products*, 27(3), 303–307.
- Dyudnev, V., Korotkii, V., Novgorodtsev, S., Boldyryev, S., Di Pretoro, A., Bragina, J., Trusova, M. & Manenti, F. (2021). Energy analysis and process simulation for the energy efficiency improvement of existing chemical plants. *Chemical Engineering Transactions*, 86, 715–720. <https://doi.org/10.3303/CET2186120>
- Eikani, M. H., Golmohammad, F. & Rowshanzamir, S. (2007). Subcritical water extraction of essential oils from coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Food Engineering*, 80(2), 735–740. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.015>
- El-Halwagi, M. (2012). *Sustainable design through process integration* (1st ed., pp. 15–61).
- El-Halwagi, M. M. (2011). *Sustainable design through process integration: Fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement*. Elsevier.
- Elwardany, M. (2024). Enhancing steam boiler efficiency through comprehensive energy and exergy analysis: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 181, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.102>
- Eskilsson, C. S., Hartonen, K., Mathiasson, L. & Riekkola, M.-L. (2004). Pressurized hot water extraction of insecticides from process dust – Comparison with supercritical fluid extraction. *Journal of Separation Science*, 27, 59–64. DOI: [10.1002/jssc.200301566](https://doi.org/10.1002/jssc.200301566)
- Esonye, C., Onukwuli, O., Anadebe, V., Ezeugo, J. & Ogbodo, N. (2021).



- Application of soft-computing techniques for statistical modeling and optimization of *Dyacrodes edulis* seed oil extraction using polar and non-polar solvents. *Heliyon*, 7(3), e06342. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06342>
- Evans, W. C. (2002). General methods associated with the phytochemical investigation of herbal products. In E. Daphne (Ed.), *Trease and Evans Pharmacognosy* (15th ed., pp. 137–148). Saunders (Elsevier).
- Fawcett Vargas, I. (2004). *Análisis de extracción de aceite de aguacate por métodos físicos y evaluación de una producción a gran escala* [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/747bfbce-b44e-4be1-8196-73fcc015a8c9/content>
- Ferdinand, W. (2012). Higher heating value (HHV) of vegetable oils, fats and biodiesels evaluation based on their pure fatty acids' HHV. *Energy*, 45(1), 798–805. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.011>
- Ferdinand, W., Van, L., Toure, S. & Martin, E. (2011). What correlation is appropriate to evaluate biodiesels and vegetable oils higher heating value (HHV)? *Fuel*, 90(1), 3398–3403. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.04.025>
- Ferraz, L. P. & Silva, E. K. (2025). Pulsed electric field-assisted extraction techniques for obtaining vegetable oils and essential oils: Recent progress and opportunities for the food industry. *Separation and Purification Technology*, 354(Part 2), 128833. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128833>
- Ferreira, M. J., Mota, M. F., Mariano, R. G. & Freitas, S. P. (2021). Evaluation of liquid–liquid extraction to reducing the acidity index of the tucuma (*Astrocaryum vulgare* Mart.) pulp oil. *Separation and Purification Technology*, 257, 117894. [10.1016/j.seppur.2020.117894](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117894)
- Figueroa, J., Borrás, I., Del Pino, R., Curiel, J., Lozano, J. & Segura, A. (2021). Functional ingredient from avocado peel: Microwave-assisted extraction, characterization and potential applications for the food industry. *Food Chemistry*, 352, 129300. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129300>

Fundación Iberoamericana de Nutrición. (2012). *Grasas y ácidos grasos en nutrición humana*. <https://www.fao.org/4/i1953s/i1953s.pdf>

Gaffney, A. M., Sims, J. W., Martin, V. J., Duprez, N. V., Louthan, K. J. & Roberts, K. L. (2021). Evaluation and analysis of ethylene production using oxidative dehydrogenation. *Catalysis Today*, 369, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.06.017>

Gao, Y., Ding, Z., Liu, Y. & Xu, Y. J. (2023). Aqueous enzymatic extraction: A green, environmentally friendly and sustainable oil extraction technology. *Trends in Food Science & Technology*, 104315.

García Campoy, A. H. & Barba de la Rosa, A. P. (2019). *Extracción por fluidos supercríticos: Una alternativa verde*. Saber Más, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/articulos/562-numero-63/1112-extraccion-por-fluidos-supercriticos-una-alternativa-verde.html>

García-Maza, S., Alviz-Meza, A. & González-Delgado, Á. D. (2025). Techno-economic analysis of a cascade biorefinery for valorizing agro-industrial waste: A case study of avocado Hass seed (*Persea americana*) from the Amazon region, Colombia. *Chemical Engineering Transactions*, 117, 559–564. <https://doi.org/10.3303/CET2511702>

Gavahian, M., Sastry, S., Farhoosh, R. & Farahnaky, A. (2020). Ohmic heating as a promising technique for extraction of herbal essential oils: Understanding mechanisms, recent findings, and associated challenges. En J. B. Taylor (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 91, pp. 227–273). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.09.001>

Geng, L., Zhou, W., Qu, X., Sa, R., Liang, J., Wang, X. & Sun, M. (2023). Iodine values, peroxide values and acid values of Bohai algae oil compared with other oils during the cooking. *Heliyon*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15088>

Gerhardt. (s.f.). *Métodos de extracción en el análisis de grasas*. <https://www.gerhardt.de/es/know-how/metodos-analiticos/metodos-de-extraccion-en-el-analisis-de-grasas/>





Gertenbach, D. D. (2002). Solid-liquid extraction technologies for manufacturing nutraceuticals. En J. Shi, G. Mazza, & M. Le Maguer (Eds.), *Functional foods. Biochemical and processing aspects* (pp. 331–366). Boca Raton, FL: CRC Press.

Godswill, A. C., Amagwula, I. O., Igwe, V. S. & Gonzaga, A. I. (2018). Effects of repeated deep frying on refractive index and peroxide value of selected vegetable oils. *International Journal of Advanced Academic Research*, 4(4). 106-119.

Gómez, J. A., Sánchez, Ó. J. & Correa, L. F. (2019). Techno-economic and Environmental Evaluation of Cheesemaking Waste Valorization Through Process Simulation Using SuperPro Designer. *Waste and Biomass Valorization*, 11(11), 6025–6045. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00833-4>

González-Cortes, A., Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y., Mosbah, A. B., Bahloul, A. & Ouellet, C. (2023). Development of a context-specific knowledge base for Inherently Safer Design (ISD) in confined spaces: A resource for designers and end users. *Process Safety and Environmental Protection*, 180, 1076–1093. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.10.068>

González-Delgado, A. D. & Aguilar-Vásquez, E. A. (2022). Análisis exergético de un proceso industrial para la remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos de agua de mar mediante micropérlas de quitosano modificadas. *Ingeniería y Competitividad*, 24(02), 17. <https://doi.org/10.25100/iyv.v0i00.11113>

González-Delgado, Á. D., Aguilar-Vásquez, E. & Ramos-Olmos, M. (2023). Chemical and Process Inherent Safety Analysis of Large-Scale Suspension Poly (Vinyl Chloride) Production. *ChemEngineering*, 7(5), 76. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7050076>

González-Delgado, A. D., Barajas-Solano, A. F. & Leon-Pulido, J. (2021). Evaluating the sustainability and inherent safety of a crude palm oil production process in North-Colombia. *Applied Sciences*, 11(3), 1046. <https://doi.org/10.3390/app11031046>

González-Delgado, A. D., Cuenca, M., Martínez, E. & Rincón, B. (2022a).

- Evaluación ambiental asistida por computador del proceso de producción de hidromiel a escala piloto en el departamento de Boyacá y Bolívar (Colombia). *Ingeniería y Competitividad*, 24(1). <https://doi.org/10.25100/iyec.24i1.11112>
- González-Delgado, A. D., Moreno-Sader, K. A. & Martínez-Consuegra, J. D. (2022b). *Biorrefinación sostenible del camarón: desarrollos desde la ingeniería de procesos asistida por computador*. Corporación Universitaria Minuto de Dios. <https://tinyurl.com/bib104444>
- González-Delgado, Á. D., Parejo, V. & Herrera, T. (2017). Computer-aided environmental evaluation of bio-hydrogen production from residual biomass of palm cultivation. *Contemporary Engineering Sciences*, 10(16), 773–783. <https://doi.org/10.12988/ces.2017.7770>
- González-Delgado, Á. D., Ramos-Olmos, M. & Aguilar-Vásquez, E. (2023). Environmental Impacts Assessment in Suspension PVC Production Process Using Computer-Aided Process Engineering. *Polymers*, 15(13), 2902. <https://doi.org/10.3390/polym15132902>
- González-Delgado, A., Álvarez-Cordero, A. & De Ávila-Alvis, Y. (2022c). Environmental Evaluation of Microalgae-based Biodiesel Production via In-situ Transesterification. *Chemical Engineering Transactions*, 92, 577–582. <https://doi.org/10.3303/cet2292096>
- Green, H. & Wang, S. (2022). Extra virgin grade avocado oil can be achieved using whole fruits or only mesocarp. *Applied Food Research*, 2(2), 100190. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100190>
- Green, H. S. & Wang, S. C. (2020). First report on quality and purity evaluations of avocado oil sold in the US. *Food Control*, 116, 107328. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107328>
- Grossi, M., Di Lecce, G., Toschi, T. G. & Riccò, B. (2014). A novel electrochemical method for olive oil acidity determination. *Microelectronics Journal*, 45(12), 1701–1707. [10.1016/j.mejo.2014.07.006](https://doi.org/10.1016/j.mejo.2014.07.006)
- Guan, W., Li, S., Yan, R., Tang, S. & Quan, C. (2007). Comparison of essential oils of clove buds extracted with supercritical carbon dioxide and other three traditional extraction methods. *Food Chemistry*, 101, 1558–1564.





- Gupta, J. P., Khemani, G. & Mannan, M. S. (2003). Calculation of Fire and Explosion Index (F&EI) value for the Dow Guide taking credit for the loss control measures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16(4), 235–241. [https://doi.org/10.1016/s0950-4230\(03\)00044-5](https://doi.org/10.1016/s0950-4230(03)00044-5)
- Gupta, R. B. & Jae-Jin, S. (2006). *Solubility in supercritical carbon dioxide*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781420005998>
- Hanmoungjai, P., Pyle, L. & Niranjana, K. (2000). Extraction of rice bran oil using aqueous media. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 75, 348–352.
- Heikkilä, A.-M. (1999). *Inherent safety in process plant design. An index-based approach* (VTT Publications 384). Technical Research Centre of Finland.
- Herrera, T., Parejo, V. & González, Á. (2018). Technoeconomic sensibility analysis of industrial agar production from red algae. *Chemical Engineering Transactions*, 70. <https://doi.org/10.3303/CET1870339>
- Herrera, T., Parejo, V. & González-Delgado, A. (2022a). Chemical and process inherent safety evaluation of avocado oil production (*Laurus persea* L.) in North Colombia. *Chemical Engineering Transactions*, 91, 247–252. <https://doi.org/10.3303/CET2291042>
- Herrera, T., Parejo, V. & González-Delgado, A. (2022b). Environmental analysis of avocado (*Laurus persea* L.) oil production in North Colombia using the Waste Reduction Algorithm. *Chemical Engineering Transactions*, 91, 241–246. <https://doi.org/10.3303/CET2291040>
- Herrera, T., Parejo, V., & González-Delgado, A. (2022c). Quality of energy conservation in an avocado oil extraction process via exergy analysis. *Chemical Engineering Transactions*, 91, 235–240. <https://doi.org/10.3303/CET2291041>
- Herrera-Rodríguez, S. E., Pacheco, N., Ayora-Talavera, T., Pech-Cohuo, S. & Cuevas-Bernardino, J. C. (2022). Advances in the green extraction methods and pharmaceutical applications of bioactive pectins

from unconventional sources: A review. In F. Atta-ur-Rahman (Ed.), *Studies in Natural Products Chemistry* (Vol. 73, pp. 221–264). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91097-2.00015-7>

Herrera-Rodríguez, T., Parejo-Palacio, V. & González-Delgado, Á. (2023). Evaluación ambiental mediante algoritmo de reducción de residuos WAR de la producción de aceite y biochar a partir de aguacate criollo en el Norte de Colombia. *Revista Ing-Nova*, 2(1), 11–22. <https://doi.org/10.32997/rin-2023-4259>

Higuera-Ciapara, I., Toledo-Guillen, A. R., Noriega-Orozco, L., Martinez-Robinson, K. G. & Esqueda-Valle, M. C. (2005). Production of a low-cholesterol shrimp using supercritical extraction. *Journal of Food Process Engineering*, 28, 526–538. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2005.00038.x>

Ibáñez, E., Herrero, M., Mendiola, J. & Castro-Puyana, M. (2012). Extraction and characterization of bioactive compounds with health benefits from marine resources: Macro and micro algae, cyanobacteria and invertebrates. In M. Hayes (Ed.), *Marine bioactive compounds* (pp. 55–98). Springer.

Ichu, C. B. & Nwakanma, H. O. (2019). Comparative study of the physico-chemical characterization and quality of edible vegetable oils. *International Journal of Research in Informative Science Application & Techniques (IJRISAT)*, 3(2), 1–9. <https://doi.org/10.46828/ijrisat.v3i2.56>

Instituto Colombiano Agropecuario. (2013). *Plan de choque en Montes de María para contrarrestar plaga en cultivos de aguacate*. <https://www.ica.gov.co/noticias/agricola/2013/plan-de-choque-en-montes-de-maria-para-contrarrest.aspx>

Janahar, J. J., Jin, Z. T. & Balasubramaniam, V. M. (2022, noviembre 9). Pulsed electric field processing applications in the food industry. *Ohioline, Ohio State University Extension*. <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fst-fabe-1002>

Jaramillo Laverde, A., Murcia Riaño, N., Martínez, M. F., Ceballos Aguirre, G., Martínez Caballero, L. N., Ángel García, C., & Rodríguez Arévalo, K. A. (2023). *Identificación y manejo de enfermedades que afectan*





la calidad comercial del fruto de aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. Hass. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) <https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7406702>

Jiménez, M., Aguilar, M., Zambrano, M. & Kolar, E. (2001). Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas. *Revista de la Sociedad Química de México*, 45(2), 89–92

Jiménez, P., García, P., Quitral, V., Vásquez, K., Parra-Ruiz, C. & Reyes-Farías, M., et al. (2020). Pulp, leaf, peel and seed of avocado fruit: A review of bioactive compounds and healthy benefits. *Food Reviews International*, 37(6), 619–655. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1717520>

Karami, R., Hoseinpour, M., Hassan, N., Rasul, M. & Khan, M. (2022). Exergy, energy, and emissions analyses of binary and ternary blends of seed waste biodiesel of tomato, papaya, and apricot in a diesel engine. *Energy Conversion and Management: X*, 16, 100288. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100288>

Kartik, A., Akhil, D., Lakshmi, D., Gopinath, K. P., Arun, J., Sivaramakrishnan, R. & Pugazhendhi, A. (2021). A critical review on production of biopolymers from algae biomass and their applications. *Bioresource Technology*, 329, 124868. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124868>

Kátaí-Urbán, L., Cimer, Z. & Lubláy, É. E. (2023). Examination of the fire resistance of construction materials from beams in chemical warehouses dealing with flammable dangerous substances. *Fire*, 6(8), 293. <https://doi.org/10.3390/fire6080293>

Kaufmann, B. & Christen, P. (2002). Recent extraction techniques for natural products: Microwave-assisted extraction and pressurised solvent extraction. *Phytochemical Analysis*, 13, 105–113. <https://doi.org/10.1002/pca.631>

Kim, W.-J., Kim, J.-D., Kim, J., Oh, S.-G. & Lee, Y.-W. (2008). Selective caffeine removal from green tea using supercritical carbon dioxide extraction. *Journal of Food Engineering*, 89, 303–309.



- Kletz, T. A. (1984). *Cheaper, safer plants, or wealth and safety at work*. IChemE.
- Kletz, T. A. (1985). *Cheaper, safer plants, or wealth and safety at work (2nd ed.)*. Loss Prevention Hazard Workshop Module. IChemE.
- Knothe, G. (2013). Avocado and olive oil methyl esters. *Biomass and Bioenergy*, 58, 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.09.003>
- Kratchanova, M., Pavlova, E. & Panchev, I. (2004). The effect of microwave heating of fresh orange peels on the fruit tissue and quality of extracted pectin. *Carbohydrate Polymers*, 56, 181–186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.01.009>
- Kroon, J. J. & Raynie, D. E. (2010). Supercritical fluid extraction. En J. Pawliszyn (Ed.), *Handbook of sample preparation* (pp. 191). John Wiley & Sons Inc.
- Lam, H. Y., Roy, P. K. & Chattopadhyay, S. (2020). Thermal degradation in edible oils by surface enhanced Raman spectroscopy calibrated with iodine values. *Vibrational Spectroscopy*, 106, 103018. DOI: 10.1016/j.vibspec.2019.103018
- Latha, C. (2000). Microwave assisted extraction of embelin from *Embelia ribes*. *Biotechnology Letters*, 29(2), 319–322. <https://doi.org/10.1007/s10529-006-9243-z>
- Lee, M. W., An, S., Latthe, S. S., Lee, C., Hong, S. & Yoon, S. S. (2013). Electrospun polystyrene nanofiber membrane with superhydrophobicity and superoleophilicity for selective separation of water and low viscous oil. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(21), 10597–10604. doi: 10.1021/am404156k.
- Lee, S., Young, R., Schiffman, P. & Coggins, C. (1983). Maturity studies of avocado fruit based on picking dates and dry weight. *Department of Botany and Plant Sciences, University of California*, 108(3), 390–394.
- Li, D. (2022). Natural deep eutectic solvents in phytonutrient extraction and other applications. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1004332. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1004332>



Li, H., Pordesimo, L. & Weiss, J. (2004). High intensity ultrasound-assisted extraction of oil from soybeans. *Food Research International*, 37, 731–738.

Li, N., Deng, C., Li, Y., Ye, H. & Zhang, X. (2006). Gas chromatography-mass spectrometry following microwave distillation and headspace solid-phase microextraction for fast analysis of essential oil in dry traditional Chinese medicine. *Journal of Chromatography A*, 1133, 29–34.

Liu, R., Salem, M., Rungamornrat, J. & Al-Bahrani, M. (2023). A comprehensive and updated review on the exergy analysis of ground source heat pumps. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102906. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102906>

Liu, W., Ye, H. & Dong, H. (2024). Molecular reconstruction of crude oil and simulation of distillation processes: An approach based on pre-defined molecules. *Chemical Engineering Science*, 295, 120141. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120141>

Liu, Y., Gong, X., Jing, W., Lin, L., Zhou, W., He, J. & Li, J. (2021). Fast discrimination of avocado oil for different extracted methods using headspace-gas chromatography-ion mobility spectroscopy with PCA based on volatile organic compounds. *Open Chemistry*, 19(1), 367–376. <https://doi.org/10.1515/chem-2020-0125>

López Sánchez, A. Y., González Lara, A. L. & Alcaraz Corona, S. (2019). Simulación para la optimización de la producción de ejes en la línea de ensamblaje de una empresa de manufactura. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(1). <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.005>

López, L., Gil, J., Sierra, M. & Hoyos, J. (2021). Hass avocado oil extraction: In the way of malaxation process optimization. *LWT*, 152, 112312. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112312>

López-Bascón, M. A. & De Castro, M. L. (2020). Soxhlet extraction. *En Liquid-phase extraction* (pp. 327–354). Elsevier.

Lorenzo, J. M., Putnik, P., Bursac Kovačević, D., Petrović, M., Munekata,



- P. E., Gómez, B., Marszałek, K., Roohinejad, S. & Barba, F. J. (2020). Silymarin compounds: Chemistry, innovative extraction techniques and synthesis. *Studies in Natural Products Chemistry*, 64. (pp. 111–130). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817903-1.00004-8>
- Lozano García, A. I. (2011). *Análisis exergético en plantas de tratamiento del ciclo integral del agua* [Tesis de maestría, Universidad de Zaragoza]. <https://zaguan.unizar.es/record/6501/files/TAZ-TFM-2011-077.pdf>
- Luque de Castro, M. D. & Priego, C. (2010). Soxhlet extraction: Past and panacea. *Journal of Chromatography A*, 1217, 2383–2389.
- Luque-García, J. L. & Luque de Castro, M. D. (2003). Ultrasound: A powerful tool for leaching. *Trends in Analytical Chemistry*, 22, 41–47.
- Luzi, F., Pannucci, E., Clemente, M., Grande, E., Urciuoli, S., Romani, A., Torre, L., Puglia, D., Bernini, R. & Santi, L. (2021). Hydroxytyrosol and oleuropein-enriched extracts obtained from olive oil wastes and by-products as active antioxidant ingredients for poly(vinyl alcohol)-based films. *Molecules*, 26(7), 2104. [10.3390/molecules26072104](https://doi.org/10.3390/molecules26072104)
- Macías, D. & Rodríguez, D. (2021). Sustitución de grasa por aceite de aguacate en la elaboración de salchicha tipo Frankfurt. *Ingeniería de Alimentos*, (104). https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/725
- Maliki, M. & Ifijen, I. H. (2020). Extraction and characterization of rubber seed oil. *International Journal of Scientific Engineering and Science*, 4(6), 24–27.
- Mallarino, L., Tejeda, L., Jiménez, M., González, Á. & Tejeda, L. (2020). Aprovechamiento sostenible del aguacate (*Laurus persea*) para la obtención de productos de valor agregado en los Montes de María en el departamento de Bolívar-Colombia. *Revista de Investigación Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 5, 32–38.
- Mamidipally, P. K. & Liu, S. X. (2004). First approach on rice bran oil extraction using limonene. *European Journal of Lipid Science and Te-*



chnology, 106, 122–125. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200300891>

Manurung, R., Naria, E., Ilmi, A. & Siregar, A. G. (2025). Utilizing a deep eutectic solvent in carotene extraction technology with palm methyl ester oil to advance green technology. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101192. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2025.101192>

Marsiglia, R., Torregrosa, E., Quintana, S. & García, L. (2018). Application of geographic information systems for characterization of preharvest and postharvest factors of squash (*Cucurbita* sp.) in Bolivar Department, Colombia. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(9), 1–10. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i9/117914>

Martínez Núñez, J., Uranga Valencia, J., Grijalva Martínez, A., Rodríguez Cabrera, A., & Lema Franco, J. (2023). Variedades, plagas y enfermedades del aguacate (*Persea americana* L.). *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 11(2), 330–335. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v11i2.520>

Martínez, L., Carnacho, F., Rodríguez, S. & Romero, M. (1988). Extracción y caracterización del aceite de aguacate. *Grasas y Aceite*, 39, 272–277. <https://www.ugr.es/~fcamacho/Originales/Trabajos%20Publicados/GA1988.pdf>

Mata, T. M., Martins, A. A. & Caetano, N. S. (2012). Microalgae processing for biodiesel production. En R. Luque (Ed.), *Advances in biodiesel production: Processes and technologies*. (pp. 204–231). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095862.2.204>

Meireles, M. A. A. (2008). Extraction of bioactive compounds from Latin American plants. En J. Martinez (Ed.), *Supercritical fluid extraction of nutraceuticals and bioactive compounds*. (pp. 243–274). CRC Press/Taylor & Francis Group.

Melo, A. F. & Mora, N. A. (2018). *Evaluación técnico-financiera para el proceso de obtención de aceite vegetal a partir de aguacate (Persea americana) variedad Lorena*. (Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América). Repositorio Institucional. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6947/1/6131983-2018-2-IQ.pdf>



- Méndez Prada, M. C. (2019). Estrategias Competitivas del Eslabón Primario en la Cadena Productiva de Aguacate de los Montes de María. *Revista De Economía & Administración* 13(1), 96-110.
- Méndez, M., Humanez, U., Pérez, J. & Bertel, C. (2015). Distribution strategies Avocado Production Chain in Los Montes de María. *Perspectiva Socioeconómica*, 1(2), 105.
- Méndez, U. I. V., Peña, D. R. I., Soto, M. I. Z. & Ramírez, M. O. (2023). Lluvia ácida: Consecuencias y acciones a tener en cuenta para disminuir el fenómeno climático. *Ciencias de la Salud*, 2(3). <https://doi.org/10.61324/csalud.2023.vol2i3.35>
- Meramo, S. I., Alarcón, C. & González, Á. D. (2020a). Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119285>
- Meramo, S. I., Gonzalez-Quiroga, A. & Gonzalez-Delgado, A. (2022). Technical, environmental, and process safety assessment of acetone–butanol–ethanol fermentation of cassava residues. *Sustainability*, 14(23), 16185. <https://doi.org/10.3390/su142316185>
- Meramo, S. I., Moreno, K. & González, A. (2019a). Computer-aided simulation and exergy analysis of TiO₂ nanoparticles production via green chemistry. *PeerJ* 7:e8113 <https://doi.org/10.7717/peerj.8113>
- Meramo, S. I., Moreno, K. & González, Á. D. (2020b). Evaluación ambiental de la producción a larga escala de microperlas de quitosano modificadas con tiourea como alternativa de valorización de residuos en el sector camaronicultor. *Prospectiva*, 18(1). <https://doi.org/10.15665/rp.v18i1.2100>
- Meramo, S. I., Ojeda, K. A. & Sanchez, E. (2019b). Environmental and safety assessments of industrial production of levulinic acid via acid-catalyzed dehydration. *ACS Omega*, 4(27), 22302–22312. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02231>
- Meramo, S. I., Puello, P. & Cabarcas, A. (2020c). Process analysis of hydrogen production via biomass gasification under computer-aided



- safety and environmental assessments. *ACS Omega*, 5(31), 19667–19681. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02344>
- Mgoma, S., Basitere, M. & Mshayisa, V. (2021). Kinetics and thermodynamics of oil extraction from South African Hass avocados using hexane as a solvent. *South African Journal of Chemical Engineering*, 37, 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.06.007>
- Mitkowski, P. & Zenka-Podlaszewska, D. (2014). Hazop method in identification of risks in a CPFR supply chain. *Chemical Engineering Transactions*, 39, 445–450. <https://doi.org/10.3303/cet1439075>
- Mocellin, P., De Tommaso, J., Vianello, C., Maschio, G., Saulnier-Bellemaire, T., Virla, L. D. & Patience, G. S. (2022). Experimental methods in chemical engineering: Hazard and operability analysis—HAZOP. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 100(12), 3450–3469. <https://doi.org/10.1002/cjce.24520>
- Mohamed, R. S. & Mansoori, G. A. (2002). *The use of supercritical fluid extraction technology in food processing*. Food Technology Magazine. The World Markets Research Centre.
- Moncada, J., Tamayo, J. & Cardona, C. A. (2016). Techno-economic and environmental assessment of essential oil extraction from oregano (*Origanum vulgare*) and rosemary (*Rosmarinus officinalis*) in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 112, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.067>
- Mopan, Y. E. A., Pino, A. F. S., Rubiano-Ovalle, O., Paz, H., & Mejía, I. R. (2023). Spatial analysis of the suitability of Hass avocado cultivation in the Cauca Department, Colombia, using multi-criteria decision analysis and geographic information systems. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(4), 136. <https://doi.org/10.3390/ijgi12040136>
- Mora-Barrantes, J. C., Alfaro-Aguilar, K., Murillo-Chaverri, M., Calderón-Quesada, M., & González-Marín, A. J. (2022). Riesgo químico: estado del arte sobre la evaluación a la exposición de sustancias químicas. *Revista Tecnología En Marcha*, 36(1), Pág. 130–139. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5875>



- Moradi-Kheibari, N., Ahmadzadeh, H., Talebi, A. F., Hosseini, M. & Murry, M. A. (2019). Recent advances in lipid extraction for biodiesel production. En R. Luque, C. S. K. Lin, K. Wilson, & J. Clark (Eds.), *Advances in feedstock conversion technologies for alternative fuels and bioproducts* (pp. 179–198). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817937-6.00010-2>
- Moreno-Sader, K., León-Pulido, J. & González-Delgado, Á. (2021). Evaluación de la producción de aceite crudo de palma y palmiste en el norte de Colombia mediante el análisis de exergía asistido por computador. *Revista ION*, 34(2). <https://doi.org/10.18273/revion.v34n2-2021003>
- Mudiyansele, D. R. W. & Wickramasinghe, I. (2023). Comparison of physicochemical characteristics of virgin coconut oils from traditional and hybrid coconut varieties. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100554. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100554>
- Mugi, V. & Chandramohan, V. (2021). Energy and exergy analysis of forced and natural convection indirect solar dryers: Estimation of exergy inflow, outflow, losses, exergy efficiencies and sustainability indicators from drying experiments. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124421>
- Mukhametov, A., Mamayeva, L., Kazhymurat, A., Akhlan, T. & Yerbulekova, M. (2023). Study of vegetable oils and their blends using infrared reflectance spectroscopy and refractometry. *Food Chemistry: X*. 17(30), 100386. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100386>
- Mustafa, A. & Turner, C. (2011). Pressurized liquid extraction as a green approach in food and herbal plants extraction: A review. *Analytica Chimica Acta*, 703, 8–18.
- Nezamodini, Z. S., Rezvani, Z. & Kian, K. (2017). Dow's fire and explosion index: A case-study in the process unit of an oil extraction factory. *Electronic Physician*, 9(2), 3878–3882. <https://doi.org/10.19082/3878>
- Nieto, A., Borrull, F., Pocurull, E. & Marcé, R. M. (2010). Pressurized liquid extraction: A useful technique to extract pharmaceuticals and per-



sonal-care products from sewage sludge. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 29, 752–764.

Nosrati, N., Naidoo, M., Harrison, S., Isafiade, A., & Tai, S. (2020). Embedding Aspen Custom Modeller for bioethanol fermentation into the Aspen Plus flowsheet simulator. *Chemical Engineering Transactions*, 80, 289–294. DOI:10.3303/CET2080049

Nyakang'i, C. O., Ebere, R., Marete, E. & Arimi, J. M. (2023). Avocado production in Kenya in relation to the world, avocado by-products (seeds and peels) functionality and utilization in food products. *Applied Food Research*, 3(1), 100275. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100275>

Oguche, J. E., Ameh, A. O., Bello, T. K. & Maina, N. S. (2023). Prospect of deep eutectic solvents in lactic acid production process: A review. *Journal of Chemical Reviews*, 5(2), 96–128. <https://doi.org/10.22034/jcr.2023.349358.1203>

Ojeda, K., Quintero, V., Rondón, S. & Kafarov, V. (2009). Evaluación de sostenibilidad de la producción de biocombustibles de segunda generación mediante la aplicación de análisis exergético. *Prospectiva*, 7(2), 19–26.

Omidvar, M. R., Khanmohammadi, S., Shababi, Z. & Kumar, R. (2024). Performance assessment and exergy analysis of hydrogen production from natural gas in a petrochemical unit (A real case study). *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 320–334. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.095>

Ortiz-Espinoza, A. P., Jiménez-Gutiérrez, A., El-Halwagi, M. M., Kazantzis, N. K. & Kazantzi, V. (2021). Comparison of safety indexes for chemical processes under uncertainty. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.069>

Ortiz-Sánchez, M., Solarte-Toro, J., González-Aguirre, J., Peltonen, K. E., Richard, P. & Cardona, C. (2020). Pre-feasibility analysis of the production of mucic acid from orange peel waste under the biorefinery concept. *Biochemical Engineering Journal*, 161, 107680. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107680>

[org/10.1016/j.bej.2020.107680](https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107680)

- Özilgen, M. & Sorgüven, E. (2011). Energy and exergy utilization, and carbon dioxide emission in vegetable oil production. *Energy*, 36(10), 5954–5967. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.020>
- Páramos, P., Granjo, J., Corazza, M. & Matos, H. (2020). Extraction of high value products from avocado waste biomass. *Journal of Supercritical Fluids*, 165, 104988. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104988>
- Parikhani, T., Delpisheh, M., Haghghi, M. A., Holagh, S. G. & Athari, H. (2021). Performance enhancement and multi-objective optimization of a double-flash binary geothermal power plant. *Energy Nexus*, 2, 100012. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100012>
- Peamaroon, N., Jakmunee, J. & Moonrungssee, N. (2021). A simple colorimetric procedure for the determination of iodine value of vegetable oils using a smartphone camera. *Journal of Analysis and Testing*, 5(1), 379–386. <https://doi.org/10.1007/s41664-021-00168-x>
- Peinado, V. P. & Cadavid, D. F. N. (2020, diciembre 17). Potencial exportador de aguacate colombiano a Corea del Sur. *Online Journal Mundo Asia Pacífico*. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/map/article/view/6793>
- Penelas, A. d. J. & Pires, J. C. M. (2021). HAZOP analysis in terms of safety operations processes for oil production units: A case study. *Applied Sciences*, 11(21), 10210. <https://doi.org/10.3390/app112110210>
- Pérez, M., & Rodríguez, R. & Santos, A. (2021a). *Estudio de factibilidad del proceso de producción sostenible de aceite de aguacate (Persea americana Miller) para uso en la industria de cosméticos*. Universidad de El Salvador.
- Pérez, M., Jiménez, E., Rodríguez, J., Ragazzo, J., Ulloa, J., Ramírez, J., Gastón, C. & Bautista, P. (2021b). Properties of the avocado oil extracted using centrifugation and ultrasound-assisted methods. *Food Science and Biotechnology*, 30(8), 1051–1061. <https://doi.org/10.1007/s10068-021-00940-w>





Pertuz, J., Sanchez, E. & Ojeda, K. (2023). Sustainable design of microbio-refineries from cassava and rejected banana coupled with renewable energy in Colombia. *Chemical Engineering Transactions*, 100, 535–540. <https://doi.org/10.3303/CET23100090>

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D. & West, R. E. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers*. McGraw-Hill.

Piedrahita, S. & Cardona, C. (2021). Small-scale biorefineries based on plantain and avocado residues. In *Waste Biorefinery* (pp. 349–374). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821879-2.00012-0>

Polo, L. (2017). *Simulación de una planta de obtención de biodiesel mediante transesterificación catalítica homogénea de trioleína de aceite de palma* [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia]. Repositorio Institucional del IPN. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/28546>

Prajapati, P., Raja, B. D., Savaliya, H., Patel, V. & Jouhara, H. (2024). Thermodynamic evaluation of shell and tube heat exchanger through advanced exergy analysis. *Energy*, 292, 130421. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130421>

Prasakti, L., Pratama, S. H., Fauzi, A., Pradana, Y. S., Budiman, A. & Rochmadi. (2020). Exergy analysis of conventional and hydrothermal liquefaction–esterification processes of microalgae for biodiesel production. *Open Chemistry*, 18(1), 874–881. <https://doi.org/10.1515/chem-2020-0132>

ProColombia. (2018). *Colombia es el nuevo proveedor ‘estrella’ de aguacate Hass para el mundo*. <https://prensa.procolombia.co/colombia-es-el-nuevo-proveedor-estrella-de-aguacate-hass-para-el-mundo>

Proyecto ColombiaMide. (2021). *Estudio sobre las necesidades y brechas de calidad en la cadena productiva de aguacate Hass y plan de acción. Antioquia y su zona de influencia, Colombia*.

Pu, W., Raman, A. A. A., Hamid, M. D., Gao, X. & Buthiyappan, A. (2023). Inherent safety concept based proactive risk reduction strategies:

A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 84, 105133. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105133>

Ramaswamy, R. & Bala Krishnan, S. (2024). Pulsed electric field treatment in extracting proteins from legumes: A review. *Processes*, 12(12), 2667. <https://doi.org/10.3390/pr12122667>

Ramírez-Gil, J., Morales, G. & Peterson, T. (2018). Potential geography and productivity of “Hass” avocado crops in Colombia estimated by ecological niche modelling. *Scientia Horticulturae*, 237, 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.021>

Rapinel, V., Claux, O., Abert-Vian, M., McAlinden, C., Bartier, M., Patouillard, N., Jacques, L. & Chemat, F. (2020). 2-Methyloxolane (2-MeOx) as sustainable lipophilic solvent to substitute hexane for green extraction of natural products: Properties, applications, and perspectives. *Molecules*, 25(15), 3417. <https://doi.org/10.3390/molecules25153417>

Raslan, R., Hassim, M. H., Chemmangattuvalappil, N. G., Ng, D. K. & Ten, J. Y. (2020). Development of inherent safety and health index for formulated product design. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 66, 104209. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104209>

Reddy, M., Moodley, R. & Jonnalagadda, S. (2012). Fatty acid profile and elemental content of avocado (*Persea americana* Mill.) oil: Effect of extraction methods. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 47(6), 529–537. <https://doi.org/10.1080/03601234.2012.665669>

Reid, R. C., Prausnitz, J. M. & Poling, B. E. (1987). *The properties of gases and liquids* (4th ed.). McGraw-Hill.

Reina-Noreña, J., Mayorga-Cobos, M. J., Caldas-Herrera, S. J., Rodríguez-Valenzuela, J., & Varón-Devia, E. H. (2015). El problema de la peca en cultivos de aguacate (*Persea americana* Mill.) del norte del Tolima, Colombia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(2), 265–278. <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/372/356>





Rezakazemi, M., Rahmanian, N., Jamil, H. & Shirazian, S. (2018). Process simulation and evaluation of ethane recovery process using Aspen-HYSYS. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 961–966. <https://doi.org/10.3303/CET1870161>

Ríos Puentes, J. Y., Orjuela Barragán, J. D., Aranguren Pineda, R. & Gutiérrez Castañeda, U. (2018). *Producción y comercialización de aceite de aguacate para uso cosmético en la ciudad de Bogotá D.C.* (Tesis de posgrado, Universidad Católica de Colombia). Repositorio institucional. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bits-treams/f045891b-2314-448e-bd0f-elb325fd5f23/content>

Ríos-Castaño, A. & Tafur-Reyes, D. (2003). *Variedades de aguacate para el trópico: Caso Colombia*. In *Proceedings V World Avocado Congress* (Actas V Congreso Mundial del Aguacate) (pp. 143–147). https://www.avocadosource.com/WAC5/Papers/WAC5_p143.pdf

Robayo, A. (2016). *Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de aguacate, Persea americana Mill. (Lauraceae) e implementación de un método de extracción del aceite de aguacate como alternativa de industrialización*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59452>

Romdhane, M. & Gourdon, C. (2002). Investigation in solid–liquid extraction: Influence of ultrasound. *Chemical Engineering Journal*, 87, 11–19. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(01\)00206-6](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(01)00206-6)

Romero, J., Vergara, L., Peralta, Y. & González, A. (2017). A techno-economic sensitivity approach for development of palm-based biorefineries in Colombia. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 1549–1554. <https://doi.org/10.3303/CET1757003>

Ros, E., López, J., Pico, C., Rubio, M., Babio, N., Sala, A., Pérez, F., Escrich, E., Bulló, M., Solana, M., Gil, A. & Salas, J. (2015). Consenso sobre las grasas y aceites en la alimentación de la población española adulta: Postura de la Federación Española de Sociedades de Alimentación, Nutrición y Dietética (FESNAD). *Nutrición Hospitalaria*, 32, 435–477. <https://doi.org/10.3305/nh.2015.32.2.9202>



- Rusli, R., Zulkarnain, I. & Ekandari, Y. (2024). Risk analysis of occupational safety and health (OSH) using the hazard and operability study (HAZOP) method for the Semani drainage project (Sentosa-Remaja-A. Yani). *JSE Journal of Science and Engineering*, 1(2), 66–72. <https://doi.org/10.30650/jse.v1i2.3883>
- Rydlewski, A. A., Pizzo, J. S., Manin, L. P., Galuch, M. B., Santos, P. D. S., Zapiello, C., Santos, O. O. & Visentainer, J. V. (2020). Evaluation of possible fraud in avocado oil-based products from the composition of fatty acids by GC-FID and lipid profile by ESI-MS. *Chemical Papers*, 74(9), 2799–2812. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01119-z>
- Sánchez-Pérez, J. (1999). Recursos genéticos de aguacate (*Persea americana* Mill.) y especies afines en México. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 5(Esp). <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.1999.01.010>
- Sandoval, A., Forero, F. & García, J. (2010). *Postcosecha y transformación de aguacate: Agroindustria rural innovadora*. Corporación colombiana de investigación agropecuaria – AGROSAVIA.
- Sangeetha, K., Ramyaa, R. B., Mousavi Khaneghah, A. & Radhakrishnan, M. (2023). Extraction, characterization, and application of tomato seed oil in the food industry: An updated review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100529. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100529>
- Santos, L., Haddad, A. & Santos, I. L. D. (2019). Process safety leading indicators in oil storage and pipelines: Building a panel of indicators. *Chemical Engineering Transactions*, 77, 73–78. <https://doi.org/10.3303/CET1977013>
- Sehana, F., Zaidul, I. S. M., Jinap, S., Karim, A. A., Abbas, K. A., Norulaini, N. A. N. & Omar, A. K. M. (2009). Application of supercritical CO₂ in lipid extraction – A review. *Journal of Food Engineering*, 95(2), 240–253.
- Semilin, V., Janaun, J., Chung, C. H., Touhami, D., Haywood, S. K., Chong, K. P. & Zein, S. H. (2021). Recovery of oil from palm oil mill effluent using polypropylene micro/nanofiber. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124144. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124144>



- Shah, M. V. & Rohit, M. C. (2013). Novel techniques for isolation and extraction of phytoconstituents from herbal plants. *American Journal of Phytomedicine and Clinical Therapeutics*, 1(4), 338–350.
- Singh, G., Singh, P., Tyagi, V., Barnwal, P. & Pandey, A. (2019). Exergy and thermo-economic analysis of ghee production plant in dairy industry. *Energy*, 167, 602–618. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.138>
- Smith, C. E. (1969). Additional notes on Pre-Conquest avocados in Mexico. *Economic Botany*, 23(2), 135–140. <https://doi.org/10.1007/bf02860618>
- Smith, J. M., Van Ness, H. C. & Abbott, M. M. (2005). *Introduction to chemical engineering thermodynamics* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Solís Carvajal, C. A., Vélez Pasos, C. A. & Ramírez-Navas, J. S. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 11(22), 26–34. <https://doi.org/10.31908/19098367.3546>
- Souza, T. S., Dias, F. F., Koblitz, M. G., & Bell, J. M. de M. (2019). Aqueous and enzymatic extraction of oil and protein from almond cake: A comparative study. *Processes*, 7(7), 472. <https://doi.org/10.3390/pr7070472>
- Sultana, S. & Haugen, S. (2022). Development of an inherent system safety index (ISSI) for ranking of chemical processes at the concept development stage. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126590. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126590>
- Suthar, P., Kaushal, M., Vaidya, D., Thakur, M., Chauhan, P., Angmo, D., Kashyap, S. & Negi, N. (2023). Deep eutectic solvents (DES): An update on the applications in food sectors. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100678. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100678>
- Tai, S. & Matsushige, K. (1986). Chemical exergy of organic matter in wastewater. *International Journal of Environmental Studies*, 27(3–4), 301–315. <https://doi.org/10.1080/00207238608710299>
- Tamayo Molano, H. (2007). Enfermedades del aguacate. *Politécnica*,

4, 51-70. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/62/49>

Tan, C. X. (2019). Virgin avocado oil: An emerging source of functional fruit oil. *Journal of Functional Foods*, 54, 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.12.031>

Tan, X., Chong, H., Hamzah, H. & Ghazali, M. (2018). Comparison of sub-critical CO₂ and ultrasound-assisted aqueous methods with the conventional solvent method in the extraction of avocado oil. *The Journal of Supercritical Fluids*, 135, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.12.036>

The World Bank. (2020). Real interest rate (%). The World Bank. <https://data.worldbank.org/indicator/FR.INR.RINR>

Trujillo, A., Kessler, W. S. & Gaither, R. (2015). Common mistakes when conducting a HAZOP and how to avoid them. *Chemical Engineering*, 122, 54–58.

Urvika, G., Gaba, R. & Kataria, R. (2025). Deep eutectic solvents. In ACS Symposium Series *American Chemical Society*. (pp. 1–29). <https://doi.org/10.1021/bk-2025-1504.ch001>

Valderrama Gutiérrez, F. F. (2018). Ohmic heater for extracting essential oils from aromatic plants. *Scientia Et Technica*, 23(2), 160–167. <https://doi.org/10.22517/23447214.16931>

Vilkhu, K., Mawson, R., Simons, L. & Bates, D. (2008). Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry – a review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.04.014>

Vivekananda, M., Yogesh, M. & Hemalatha, S. (2007). Microwave assisted extraction – an innovative and promising extraction tool for medicinal plant research. *Pharmacognosy Reviews*, 1(1), 1–18.

Waldeback, M. (2005). *Pressurized liquid extraction: A sustainable technique with added values (PhD thesis)*. Uppsala University, Sweden.





Wang, H.-C., Chen, C.-R. & Chang, C. J. (2001). Carbon dioxide extraction of ginseng root hair oil and ginsenosides. *Food Chemistry*, 72, 505–509.

Williams, L. O. (1977). The avocados, a synopsis of the genus *Persea*, subg. *Persea*. *Economic Botany*, 31(3), 315–320. <https://doi.org/10.1007/bf02866883>

Xuan, C. (2019). Virgin avocado oil: An emerging source of functional fruit oil. *Journal of Functional Foods*, 54, 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.12.031>

Yabrudy Vega, J. (2012). *El aguacate en Colombia: Estudio de caso de los Montes de María, en el Caribe colombiano* (Documento de Trabajo sobre Economía Regional y Urbana No. 171). Banco de la República. <https://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/3083>

Ying, L., Marilena, R., Anne-Sylvie, F. T. & Farid, C. (2013). From laboratory to industrial: scale-up, quality, and safety consideration for microwave-assisted extraction. In F. Chemat & G. Cravatto (Eds.), *Microwave-assisted extraction for bioactive compounds: Theory and practice* (Food Engineering Series 4, pp. 207–230). Springer Science.

Yu, Y., Jin, T. Z., Fan, X. & Wu, J. (2018). Biochemical degradation and physical migration of polyphenolic compounds in osmotic dehydrated blueberries with pulsed electric field and thermal pretreatments. *Food Chemistry*, 239, 1219–1225. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.071>

Yuan, S., Xu, Y., Bai, Y., Reniers, G. & Yang, M. (2023). Conceptual and practical applications of ISD. In *Methods in Chemical Process Safety* (pp. 183–211). <https://doi.org/10.1016/bs.mcps.2023.05.005>

Zaldivar-Ortega, A. K., Barrera-Jiménez, J. A., De Jesús Cenobio-Galindo, A., Pérez-Soto, E., Franco-Fernández, M. J. & Campos-Montiel, R. G. (2023). Potencial uso de la cáscara y semilla de aguacate como fuente de compuestos bioactivos con actividades funcionales para un desarrollo sustentable. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 9(18), 30–33. <https://doi.org/10.29057/icap.v9i18.9058>



- Zaranejad, A. & Ahmadi, O. (2015). Fire and explosion risk assessment in a chemical company by the application of DOW fire and explosion index. *Journal of Occupational Health and Epidemiology*, 4(3), 163–175. <https://doi.org/10.18869/acadpub.johe.4.3.163>
- Zareei, H., Nikou, M. K. & Shariati, A. (2015). A consequence analysis of the explosion of spherical tanks containing liquefied petroleum gas (LPG). *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, 5(3), 32–44. <https://doi.org/10.22050/ijogst.2016.38529>
- Zarnowski, R. & Suzuki, Y. (2004). Expedient Soxhlet extraction of resorcinolic lipids from wheat grains. *Journal of Food Composition and Analysis*, 17, 649–664. DOI:10.1016/j.jfca.2003.09.007
- Zhang, R., Chen, K., Chen, X., Yang, B. & Kan, J. (2021). Thermostability and kinetics analysis of oil color, carotenoids and capsaicinoids in hotpot oil models (butter, rapeseed oil, and their blends). *LWT*, 152, 112216.
- Zhou, C., Adeyanju, A. A., Nwonuma, C. O., Inyinbor, A. A., Alejlowo, O. O., Al-Hamayda, A., Akinsemolu, A., Onyeaka, H. & Olaniran, A. F. (2024). Physical field-assisted deep eutectic solvent processing: A green and water-saving extraction and separation technology. *Journal of Food Science*, 89, 8248–8275. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17545>
- Zhu, C. & Wang, J. (2024). Process structure-based fully connected neural network for the modelling of chemical processes: A comparison between global and modular configurations. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 157, 105430. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105430>
- Zuorro, A., Moreno-Sader, K. A. & González-Delgado, Á. D. (2021). Inherent safety analysis and sustainability evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia. *Water*, 13(4), 553. <https://doi.org/10.3390/w13040553>



GLOSARIO DE TÉRMINOS

α -tocoferol: Es la forma más activa y esencial de la vitamina E, el cual presenta una notable variabilidad en su concentración en el aceite de aguacate.

β -caroteno: Este es el carotenoide más prevalente en la naturaleza y el más relevante en la alimentación humana, lo que lo convierte en el epónimo de toda una categoría de compuestos bioquímicos.

Ácidos grasos insaturados: Son compuestos de cadena larga con enlaces dobles entre los átomos de carbono en su estructura de ácido carboxílico. Se encuentran en algunas grasas vegetales, como el aceite de oliva y de girasol, así como en las grasas de los pescados azules.

Ácido graso monoinsaturado: Son aquellos compuestos de cadena de carbono par que contienen únicamente una insaturación en su estructura, es decir, un solo doble enlace entre átomos de carbono. Un ejemplo de esta categoría es el ácido oleico, presente en la mayoría de las grasas naturales, conocido coloquialmente como omega 9.

Ácido graso poliinsaturado: Son aquellos que tienen más de un enlace doble entre los átomos de carbono en su estructura. Estos se dividen en dos familias principales: el omega 6, que incluye el ácido araquidónico y el ácido linoleico, y el omega 3, compuesto por el ácido docosahexaenoico, el ácido alfa linoleico y el ácido eicosapentaenoico.

Ácidos grasos saturados: Estos ácidos grasos son aquellos que no presentan enlaces dobles entre los átomos de carbono. Tienen una tendencia a formar cadenas alargadas y suelen ser sólidos a temperatura ambiente, a excepción de aquellos con cadenas cortas. Los ácidos grasos de cadena corta, también conocidos como volátiles, incluyen el ácido butírico (ácido butanoico), el ácido isobutírico (ácido 2-metilpropionico), el ácido valérico (ácido pentanoico) y el ácido isovalérico (ácido 3-metilbutanoico). Por otro lado, los ácidos grasos de cadena larga comprenden el ácido mirístico (14:0 o ácido tetradecanoico), el ácido palmítico (16:0 o ácido hexadecanoico) y el ácido esteárico (18:0 o ácido octadecanoico).





Antocianinas: Las antocianinas son derivados glucósidos de antocianidinas, pertenecientes al grupo de los flavonoides, que consisten en dos anillos aromáticos A y B conectados por una cadena de tres carbonos. El tono de color de las antocianinas varía en función del número y la disposición de los grupos hidroxilo y metoxilo presentes en la molécula. Aumentos en la hidroxilación provocan un cambio hacia tonalidades azules, mientras que aumentos en las metoxilaciones generan tonos rojizos.

Biomasa residual: Son desechos orgánicos generados como resultado de las actividades humanas, como los residuos sólidos urbanos y aquellos provenientes de actividades agrícolas, ganaderas o industriales. Estos residuos pueden ser categorizados como húmedos o secos.

Carotenoides: Los pigmentos solubles en lípidos, conocidos como carotenoides, son componentes naturales presentes en diversos alimentos y organismos.

Células parenquimatosas: El parénquima, o las células parenquimáticas, se distribuye ampliamente en todos los sistemas de tejidos de las plantas, presentándose en la corteza y médula de tallos y raíces, así como en el mesófilo de las hojas, la pulpa de los frutos y el endospermo de las semillas. Este tipo de tejido, que puede representar hasta un 80 % de las células vivas de una planta, ocupa espacios entre otros tejidos y dentro de ellos. Además, juega un papel crucial en la capacidad de regeneración de las plantas tras sufrir daños.

Clorofila: Durante el proceso de fotosíntesis, las clorofilas, pigmentos encontrados en las plantas verdes, desempeñan un papel crucial al absorber y convertir la energía solar en energía química.

FAME: son ésteres metílicos de ácidos grasos. Se producen mediante la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales con metanol. Los FAME son los componentes principales del biodiésel, un combustible renovable y biodegradable que se utiliza como alternativa al diésel convencional.

Fitoquímicos: compuestos bioactivos producidos por las plantas con la finalidad protegerse de la amenaza de hongos, bacterias y virus, y también impedir su consumo por parte de animales e insectos.



Hipoclorito de sodio: El hipoclorito de sodio, también llamado hipoclorito sódico, es un compuesto químico de fórmula NaClO , reconocido por su acción oxidante y ampliamente empleado como biocida o desinfectante. Su disolución en agua es conocida en diferentes regiones como lejía, cloro o lavandina.

LC_{50} (Concentración letal): Es una medida de la toxicidad aguda de una sustancia química en el aire, indicando la concentración que causa la muerte del 50% de los animales expuestos en un tiempo específico. Se expresa en partes por millón (ppm) o en miligramos por metro cúbico (mg/m^3) y se determina mediante pruebas de toxicidad en animales de laboratorio, donde se exponen a diferentes concentraciones de la sustancia. La LC_{50} es crucial para evaluar la toxicidad y establecer límites seguros de exposición en la industria.

LD_{50} (Dosis Letal): Es una medida de la toxicidad aguda de una sustancia química, indicando la cantidad que causa la muerte del 50% de un grupo de animales de prueba en un período de tiempo específico. Se expresa en miligramos de sustancia por kilogramo de peso corporal (mg/kg) y se determina mediante pruebas de toxicidad en animales de laboratorio, donde se expone a diferentes dosis de la sustancia y se registra el número de muertes. La LD_{50} es crucial en la evaluación de la toxicidad y en el establecimiento de límites de exposición seguros en la industria.

Liposolubles: Las sustancias que son solubles en grasas, aceites y otros solventes orgánicos no polares como el benceno y el tetracloruro de carbono son conocidas como liposolubles. Entre estas se encuentran las vitaminas A, D, E y K.

Lluvia ácida: La lluvia ácida es el resultado de la interacción entre los gases liberados por la quema de combustibles y el oxígeno del aire, así como el vapor de agua, que forman ácidos transportados por la lluvia. Este fenómeno abarca cualquier tipo de precipitación con altas concentraciones de ácido sulfúrico y nítrico, pudiendo manifestarse también como nieve, niebla y partículas secas. Comparada con la lluvia normal, que tiene un pH de 5,6, la lluvia ácida suele tener un pH entre 4,2 y 4,4.

Metilesteres: son productos derivados de la transesterificación de grasas



con metanol, catalizada por álcali. Principalmente obtenidos a partir de aceites vegetales, los FAME son moléculas fundamentales en la producción de biodiésel, además de tener aplicaciones en la fabricación de detergentes.

MUFA: son ácidos grasos monoinsaturados, lo que significa que tienen un solo doble enlace en su cadena de carbono. Estos ácidos son beneficiosos para la salud, debido a que pueden ayudar a reducir el colesterol LDL (colesterol “malo”) y aumentar el colesterol HDL (colesterol “bueno”).

NIOSH: es una agencia de investigación que forma parte de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), creada por la Ley de Seguridad y Salud Ocupacional de 1970. Su misión es generar nuevos conocimientos en el campo de la seguridad y salud ocupacional y transferirlos a los trabajadores.

NOx: son la combinación de gases que contienen nitrógeno y oxígeno. Los más comunes son el óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno. Se forman principalmente durante procesos de combustión a altas temperaturas.

OSHA: es una agencia del Departamento de Trabajo de los Estados Unidos. Fue creada bajo la Ley de Seguridad y Salud Ocupacional de 1970, y su misión principal es asegurar condiciones de trabajo seguras y saludables para los trabajadores.

PUFA: Los PUFA son ácidos grasos poliinsaturados, que contienen más de una doble ligadura en su cadena de carbono. Incluyen ácidos grasos esenciales que el cuerpo no puede sintetizar por sí mismo, por lo que deben ser obtenidos a través de la dieta.

Saponificación: es una reacción química en la que un triglicérido reacciona con una base fuerte (como el hidróxido de sodio o hidróxido de potasio) para formar glicerol y sales de ácidos grasos (jabón).

Smog: El esmog, también conocido como smog, es una mezcla de humo, niebla y varias partículas presentes en la atmósfera de regiones con altos niveles de contaminación.

SOx: son producto de la combinación de gases que contienen azufre y oxígeno.

no. El más común es el dióxido de azufre. Se forman principalmente a partir de la combustión de hidrocarburos que contienen azufre, como el carbón y el petróleo.

Transesterificación: es la reacción entre un triglicérido con un alcohol para formar ésteres y glicerol. Esta reacción es fundamental en la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales o grasas animales.

UNIFAC: es un modelo termodinámico utilizado para predecir los coeficientes de actividad de los componentes en mezclas líquidas no ideales. Fue desarrollado para permitir la estimación de propiedades termodinámicas de mezclas complejas basándose en la estructura molecular, sin necesidad de disponer de datos experimentales.

UNIQUAC: es un modelo termodinámico utilizado para predecir los coeficientes de actividad en soluciones líquidas no ideales. Fue desarrollado por Abrams y Prausnitz en 1975 y se basa en una combinación de contribuciones combinatorias y residuales para describir las interacciones entre moléculas en una mezcla.





ABREVIATURAS

α_i : Absorción de calor por radiación por unidad de gas de efecto invernadero i , para GWP.

α_{CO_2} : Absorción de calor por radiación por unidad de dióxido de carbono, para GWP.

α_i : Cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de un compuesto orgánico volátil i , para el PCOP.

$\alpha_{\text{C}_2\text{H}_4}$: Cambio en la concentración de ozono, con respecto a la emisión de etileno, para PCOP.

ACR: Annual cost/revenue (Relación costo beneficio).

AEP: Annual economic profits (Beneficios económicos anuales).

AFC: Annualized Fixed Costs, (Costos fijos anualizados).

ALA: Ácido linoleico.

AOC: Annualized Total Operating costs, (Costos operativos anualizados).

AP: Acidification potential, (Potencial de acidificación).

ASPEN: Advanced System for Process Engineering, (Sistema Avanzado para Ingeniería de Procesos).

Atm: Unidad de presión en atmósferas.

ATP: Acuatric toxicity potential, (Potencial de toxicidad acuática).

$b_i(t)$: Emisión integrada de un compuesto orgánico volátil i hasta un tiempo t .

$b_{\text{C}_2\text{H}_4}(t)$: Emisión integrada de etileno hasta un tiempo t .





BEP: Breakeven point (Punto de equilibrio).

$c_i(t)$: Concentración del gas de efecto invernadero i .

$c_{CO_2}(t)$: Concentración de dióxido de carbono en un tiempo t después de haberse liberado.

CCF: Cumulative Cash Flow (Flujo de caja acumulado).

CFC-II: Triclorofluorometano.

CH_4 : Metano.

C_2H_4 : Etileno.

CO_2 : Dióxido de carbono.

$^{\circ}C$: Centígrados (unidad de temperatura).

D: Depreciation, (Depreciación).

DFCI: Direct fixed capital investment (Inversión de capital fijo directo).

DGP: Gross Profit (depreciation included), (Beneficio bruto con depreciación incluida).

DPC: Direct productions costs, (Costos de producción directos).

DPBP: Discounted payback period, (Período de Recuperación de la Inversión incluyendo la depreciación).

EP: Economic potential, (Potenciales económicos).

EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos).

Ex: Exergía.

FA: Ácidos grasos (fatty acids)



FAME: *Fatty acid methyl ester (Éster metílico de ácidos grasos).*

FCH: *Fixed charges, (Cargos directos).*

FCI: *Fixed capital investment, (Inversion de capital fijo).*

F&E: *Fire and explosion.*

FOB: *Free on board.*

GC: *Cromatografía de gases (gas chromatography)*

GE: *General expenses, (Gastos generales).*

GEI: *Emisión de gases de efecto invernadero.*

GP: *Gross Profit, (Beneficio bruto).*

GWP: *Global warming potential, (Potencial de calentamiento global).*

\dot{H} : *Entalpía de la mezcla.*

\dot{H}_0 : *Entalpía de la mezcla a las condiciones del ambiente de referencia.*

HAZOP: *Hazard and Operability Study (Estudio de riesgo y operabilidad).*

HDL: *Lipoproteínas de alta densidad*

HTPE: *Human Toxicity Potential by Inhalation or Dermal Exposure (Potencial de toxicidad humana por inhalación o exposición dérmica).*

HTPI: *Human toxicity potential by ingestion (Potencial de toxicidad humana por ingestión).*

i: *Interest, (Interés).*

ISBL: *Inside Battery Limits, (Límites de la batería interna).*

ISD: *Diseño intrínsecamente más seguro*



ISI: *Inherent safety index, (Índice de seguridad inherente).*

IFCI: *Indirect fixed capital investment, (Inversión de capital fijo indirecto).*

itr: *Income taxes rate, (Tasa impositiva).*

K: *Kelvin (unidad de temperatura).*

Kg: *Kilogramos.*

kg SO₂-equiv.: *Kilogramos de dióxido de azufre equivalente.*

kg C₂H₄-equiv.: *Kilogramos de etileno equivalente.*

LD₅₀: *Lethal Dose, (Dosis letal).*

LC₅₀: *Lethal concentration, (Concentración letal).*

LA: *Ácido linoleico (linoleic acid)*

LDL: *lipoproteínas de baja densidad*

LEL: *Lower Explosive Limit, (Límite inferior de explosividad).*

LLE: *Equilibrio líquido-líquido.*

NRTL: *Non-Random Two-Liquid, (Modelo no aleatorio de dos líquidos).*

m_i: *Masa (kg) del gas emitido, para ODP.*

m_i: *Masa (kg) de un componente significativo i emitido, para AP.*

m_i: *Masa (kg) del compuesto orgánico volátil emitido, para PCOP.*

M_i: *Unidad de masa de la sustancia i, para AP.*

M_{SO₂}: *Unidad de masa del SO₂, para AP.*

mg: *miligramos.*

MAE: *Microwave Assisted Extraction (Extracción asistida por microondas).*

MM USD: *Millones de dólares estadounidense.*

MR: *Maintenance and repairs, (Mantenimiento y reparaciones).*

: *Raw material, (flujo de materia prima).*

Raw material at Breakeven point, (Capacidad de producción de equilibrio).

MSDS: *Material safety data sheet (Hojas de seguridad).*

msnm: *Metros sobre el nivel del mar.*

MUFAS: *Ácidos grasos monoinsaturados (monounsaturated fatty acids).*

N: *Años.*

n: *Años.*

NaClO: *Hipoclorito de sodio.*

NIOSH: *National Institute for Occupational Safety and Health (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional).*

NOC: *Normalized Operating costs, (Costos totales operativos normalizados).*

NOx: *Óxidos de nitrógeno.*

NVOC: *Normalized Variable Operating costs (Costos operativos variables).*

NVP: *Net present value, (Valor presente neto).*

ODP: *Ozone depleting potential, (Potencial de Agotamiento del Ozono).*

OH-: *Radical hidroxilo.*

OL: *Operational labor, (Mano de obra operativa).*





OC: *Operating cost (Costos de operación).*

OSBL: *Outside Battery Limits, (Límites de la batería externa).*

OSHA: *Occupational Safety and Health Administration (Administración de Seguridad y Salud en el Trabajo).*

PAT: *Profit After taxes, (Beneficio después de impuestos).*

PBP: *Payback Period (Período de Recuperación de la Inversión sin incluir depreciación).*

PEI: *Potential environmental impacts (Impacto ambiental potencial).*

PLE: *Pressurized Liquid Extraction (Extracción con líquidos presurizados).*

PCOP: *Photochemical Oxidation Potential, (Potencial de Oxidación Fotoquímica o Potencial de formación de Smog).*

PIIS: *Índice de prototipo de seguridad inherente*

POH: *Production overhead, (Gastos generales de producción).*

PUFA: *ácidos grasos poliinsaturados (Poly-Unsaturated Fatty Acids).*

R: *Constante universal para gases ideales.*

RK: *Redlich Kwong.*

ROI: *Return on investment, (Retorno de la inversión).*

SFE: *Supercritical Fluid Extraction (Extracción con fluidos supercríticos).*

SE: *Soxhlet extraction (Extracción soxhlet).*

SO₂: *Dióxido de azufre.*

SO_x: *Óxidos de azufre.*

SRK: *Soave Redlich Kwong.*



SUC: *Startup costs (Costos de arranque).*

\dot{S}_0 : *Entropía de la mezcla a las condiciones del ambiente de referencia.*

t: *Número de años para evaluar el GWP.*

T: *Temperatura del sistema.*

t: *Toneladas.*

T_0 : *Temperatura del ambiente de referencia.*

TAC: *Total annual costs, (Costos totales anualizados).*

TCI: *Total capital investment (Inversión total de capital).*

TIR: *Tasa interna de retorno, (Internal rate of return, IRR).*

TLV: *Threshold Limit Value (valor umbral límite).*

TTP: *Terrestrial Toxicity Potential, (Potencial de Toxicidad Terrestre).*

USD: *United states dollars, (dólar estadounidense).*

UNQUAC: *Universal QUasi Chemical Equation.*

UNIFAC: *UNQUAC Functional-group Activity Coefficients, (UNQUAC Coeficientes de actividad de grupos funcionales).*

U: *Utilities, (Utilidades).*

UAE: *Ultrasound assisted extraction (Extracción asistida por ultrasonido).*

USD: *United states dollar (dólar estadounidense).*

UEL: *Upper Explosive Limit, (Límite superior de explosividad).*

V_i : *Potencial de acidificación del componente i.*

V_{SO_2} : *Potencial de acidificación del SO_2 .*

W: *Work (trabajo del sistema).*

VOC: *Compuestos orgánicos volátiles.*

WCI: *Working capital investment, (Inversión de capital de trabajo).*



WAR: *Waste Algorithm Reduction (Algoritmo de reducción de residuos).*

$\delta[O_3]$: *Agotamiento de ozono.*

ANEXO A: DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

Los autores han participado en distintos eventos como congresos locales, nacionales e internacionales lo que les ha permitido llevar estos hallazgos a la comunidad científica y demás interesados sobre el tema de aprovechamiento de residuos de tipo agrícola, específicamente provenientes del cultivo de aguacate. Además, se han publicado alrededor de 6 artículos relacionados con el aprovechamiento de la pulpa de esta fruta para la obtención de aceite. A continuación, se observan algunas de las publicaciones y participaciones en revistas y eventos científicos.

Participación en la 10th International Conference on Safety and Environment in Process & Power Industry - CISAP 10, realizada en mayo de 2022 en Florencia, Italia.

Participación en la International Conference on Biomass – IconBM 2022, realizada en junio de 2022 en Nápoles, Italia.

Así mismo, estos resultados hacen parte del trabajo de grado de las ingenieras químicas egresadas de la Universidad de Cartagena Tamy Herrera Rodríguez y Vianny Parejo Palacio, con el cual ganaron en 2023 el III Premio Rebeca Uribe Bone, otorgado por el Consejo Profesional de Ingeniería Química – CPIQ a la mejor tesis grado de pregrado de toda Colombia realizado por una mujer o grupo de mujeres en la categoría Innovación. El trabajo realizado se titula “Evaluación de la sostenibilidad del aprovechamiento integral del aguacate (*Laurus Persea L.*) para la obtención de productos de valor agregado proveniente de los Montes de María” dirigido por el Doctor Ángel Darío González Delgado. Este trabajo de grado compitió con trabajos realizados en las 20 universidades del país donde se ofrece el programa de Ingeniería Química, resultando ganador tanto a nivel regional como a nivel nacional.

Ganadoras del III Premio Rebeca Uribe Bone, otorgado por el Consejo Profesional de Ingeniería Química – CPIQ a la mejor tesis grado de pregrado de Colombia realizado por una mujer o grupo de mujeres en la categoría Innovación, trabajo dirigido por el Doctor Ángel González Delgado, profesor del programa de Ingeniería Química.





EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE: SEGURIDAD, SOSTENIBILIDAD E INGENIERÍA COMPUTACIONAL

